

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového Inženýrství

Katedra materiálového inženýrství



**Vlastnosti oceli AISI 316 připravené 3D tiskem**

**Properties of AISI 316 steel prepared by 3D printing**

Student:

Bc. Tomáš Hlobil

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Kraus, Ph.D.

Konzultant:

Ostrava 2018

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Hlobil**  
Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství  
Studijní obor: 3911T036 Progresivní technické materiály  
Téma: **Vlastnosti oceli AISI 316 připravené 3D tiskem**  
**Properties of AISI 316 steel prepared by 3D printing**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Teoretická část

- Technologie 3D tisku,
- Materiály připravované 3D tiskem,
- Vlastnosti a využití 3D tištěných materiálů.

Praktická část

- Mikrostruktura oceli AISI 316 připravené 3D tiskem,
- Mechanické a korozní vlastnosti oceli AISI 316 připravené 3D tiskem,
- Srovnání vlastností materiálů vyrobených klasickými technologiemi a 3D tiskem.

Diskuze, závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] McEVILLY, A. J.: Metal Failures, Mechanism, Analysis, Prevention, Wiley and Sons, 2013.
- [2] HOSFORD, W.F.: Mechanical Behaviour of Materials, Cambridge University Press, 2005.
- [3] PORTER D. A., EASTERLING, K. E., SHERIF M. Y.: Phase Transformations in Metals and Alloys, Third edition, CRC Press. 2009.
- [4] DEEV, A. A., KUZNETCOV, P. A., PETROV, S. N.: Anisotropy of mechanical properties and its correlation with the structure of stainless steel 316L produced by SLM method, Physics Procedia 83, Elsevier, 2016.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Kraus, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 09.05.2018

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování diplomové práce

## I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah DP                  |
| 2. Originál zadání DP                        | 7. Textová část DP           |
| 3. Zásady pro vypracování DP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).



Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

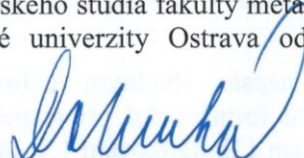
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení DP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě ..... 6.5.2018

.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Krausovi, Ph.D. z katedry materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava za poskytování cenných rad v celém průběhu diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Lukáši Horsákovi za velikou pomoc s tahovými zkouškami, paní Ing. Kateřině Konečné za pomoc na elektronovém mikroskopu a panu Ing. Jiřímu Hajnyšovi za poskytnutí příležitosti podílet se na tomto výzkumu.

Tato diplomová práce vznikla za přispění projektů Studentské grantové soutěže „SP2018/70 Studium souvislostí mezi technologií výroby a zpracováním pokročilých materiálů, jejich strukturními parametry a užitnými vlastnostmi“ a „SP2018/60 Specifický výzkum v metalurgickém, materiálovém a procesním inženýrství“.

## **Abstrakt Diplomové práce**

Diplomová práce se zabývá možnostmi moderních metod výroby kovových materiálů tzv. 3D tiskem. Je zaměřená na austenitickou korozivzdornou ocel AISI 316L, která se používá v mnoha náročných technických aplikacích, jako je potravinářství, chemický průmysl, energetika, apod. Významné je rovněž použití tohoto materiálu v medicínských aplikacích, zejména v oblasti protetiky a výroby implantátů. Experimentální část porovnává vlastnosti této oceli na vzorcích vyrobených 3D tiskem a konvenčními technologiemi. Sledovány jsou mechanické vlastnosti, mikrostrukturní a fraktografické charakteristiky a korozní odolnost ve vybraných prostředích. Získané poznatky jsou shrnuty a hodnoceny v závěru.

**Klíčová slova:** 3D tisk, ocel AISI 316L, mikrostruktura, mechanické vlastnosti, elektrochemické vlastnosti

## **ABSTRACT OF THESIS**

The thesis concerns on possibilities of modern methods of metallic materials production made by 3D printing. The thesis is focused on austenitic stainless steel AISI 316L, which is used in many demanding technical disciplines such as food or chemical industry, energetics etc. Usage of this material is also significant in medical disciplines, especially prosthetics and implant production. The experimental part compares properties of the AISI 316L on samples made by 3D printers and conventional methods of producing. Also the mechanical properties of microstructural and fractographical characteristics and corrosion resistance in selected environment are monitored. Gained knowledge is summarized and evaluated in conclusion.

**Keywords:** 3D print, steel AISI 316L, microstructure, mechanical properties, electrochemical properties



## Přehled veličin a jejich jednotky

Veličina	Význam	Jednotka
$\varepsilon$	Celková deformace	
$E$	Modul pružnosti v tahu / tlaku	MPa
$\sigma$	Mechanické napětí	MPa
$t$	Čas po zatížení	sec
$\Delta L$	Absolutní celkové prodloužení	mm
$L_0$	Počáteční měřená délka	mm
$L$	Délka (po přetržení)	mm
$\psi$	Poměrné zúžení	
$\Delta S$	Absolutní celkové zúžení	mm <sup>2</sup>
$S_0$	Počáteční průřez tělesa	mm <sup>2</sup>
$S$	Průřez tělesa (po přetrhnutí)	mm <sup>2</sup>
$F$	Síla	N
$\sigma_0$	Smluvní napětí v tahu	MPa
$R_{p0,2}$	Mez kluzu	MPa
$R_m$	Mez pevnosti	MPa
$A_m$	Tažnost změřená manuálně	%
$A_t$	Tažnost změřená extenzometrem	%
$Z$	Kontrakce	%
HV	Tvrdost podle Vickerse	
HV30	Tvrdost podle Vickerse se zatížením 30Kg	
$R_a$	Střední aritmetická drsnost povrchu	μm

<b>Veličina</b>	<b>Význam</b>	<b>Jednotka</b>
$E(i=0)$	Korozní potenciál	mV
$R_p$	Polarizační odpor	$A \cdot cm^2$
Corrosion Rate	Korozní rychlost	$\mu m/Y$
C	Vrubová houževnatost	J

# Obsah

Přehled veličin a jejich jednotky .....	8
Úvod.....	12
1. Technologie 3D tisku.....	13
1.1. Historie 3D tisku.....	13
1.2. Vývoj 3D tisku .....	13
1.3. Různé technologie v 3D tisku .....	15
1.3.1. Stereolithography (SLA).....	15
1.3.2. Digital Light Processing (DLP) .....	15
1.3.3. Fused deposition modeling (FDM).....	16
1.3.4. Laminated Object Manufacturing (LOM).....	16
1.3.5. Selective Laser Sintering (SLS).....	17
1.3.6. Selective laser melting (SLM).....	18
1.3.7. Electronic Beam Melting (EBM).....	19
1.3.8. Kovové 3D metody založené na oblouku (Arc-based metal 3D printing methods) .....	20
1.3.9. Ultrazvukové metody svařování založené na 3D metodách .....	20
2. Materiály připravované 3D tiskem.....	21
2.1. Materiály a materiálové systémy pro 3D tisk .....	22
2.2. Mikrostruktura a vlastnosti .....	23
2.3. Mechanismus teplotního gradientu .....	27
2.4. Různé procesní teploty.....	27
2.5. Mechanické vlastnosti.....	28
2.6. Oceli AISI 316.....	30
3. Vlastnosti a využití 3D tištěných materiálů .....	32
3.1. Medicínské využití.....	32
4. Experimentální část.....	36
4.1. AISI 316L vytvořená pomocí 3D tisku .....	36
4.2. Materiál.....	36



4.3.	Parametry výroby .....	36
4.4.	Vytvoření vzorků.....	37
4.5.	Hodnoty velikosti vzorků.....	37
4.6.	Technická dokumentace .....	39
4.7.	Zkouška tahem .....	41
4.8.	Drsnost povrchu .....	48
4.9.	Zkouška tvrdosti.....	50
4.10.	Zkouška rázem v ohybu.....	51
5.	Metalografické pozorování.....	51
5.1.	Hodnocení lomových ploch.....	60
6.	Analýza chemického složení .....	71
6.1.	EDX analýza .....	71
6.2.	Porovnání hodnot chemického složení .....	71
7.	Zkouška odolnosti proti koroznímu prostředí.....	72
	Závěr.....	74
	Použitá literatura .....	76

## Úvod

Diplomová práce se zabývá experimentálním výzkumem v oblasti technologie 3D tisku kovových materiálů. Jejím cílem je zhodnotit vliv této technologie výroby (přípravy) na vlastnosti produktu, resp. materiálu v porovnání s klasickými technologiemi (odlévání, válcování, obrábění), a zda je použitelná v oblastech, kde konvenční metody výroby selhávají z hlediska složitosti tvaru výrobku, malé sériovosti, energetické a environmentální náročnosti. Sledovaným materiálem je ocel 1.4404 (AISI 316L) v podobě prášku, který byl připraven atomizací taveniny za pomoci inertního plynu. Jedná se o austenitickou korozivzdornou ocel s vysokým obsahem chromu, který zaručuje korozní odolnost, a vysokým obsahem niklu a molybdenu. Tato ocel se využívá v lékařství pro chirurgické nástroje anebo implantáty pro fixaci zlomenin. Dále je využívána v zařízeních vodního hospodářství nebo v potravinářském a chemickém průmyslu pro svou korozní odolnost. Materiál AISI 316L je navíc ekonomicky a technologicky snadněji zpracovatelný (při obdobné kombinaci vlastností), než např. materiály na bázi titanu.

Praktická část je zaměřena na porovnání širšího spektra vlastností vzorků vyrobených pomocí 3D tisku a „konzervativními“ postupy (tvářením). V oblasti mechanických vlastností se hodnotily parametry zkoušky tahem, zkoušky rázem v ohybu dle Charpyho, zkoušky tvrdosti podle Virckerse a drsnost. Naměřené hodnoty vytvářejí základní obraz o možnostech použití výrobků připravených 3D tiskem. Dále bylo provedeno metalografické hodnocení mikrostruktury světelnou i elektronovou mikroskopií, proběhlo základní fraktografické hodnocení lomových ploch, či porezity. Vzhledem ke korozní odolnosti příslušné jakosti oceli a předpokládaným aplikacím byly také provedeny elektrochemické zkoušky ve vybraných typech korozních prostředí blízkých podmínkám lidského těla.

## 1. Technologie 3D tisku

3D tisk je proces, kdy se z 3D modelu vytvořeného v počítači, vytvoří funkční součást. Za pomoci programů a softwaru je 3D model převeden na 2D řezy, a každý z těchto řezů představuje jednu nanesenou vrstvu materiálu. Sestavením těchto jednotlivých vrstev vzniká zpětně objekt v 3D [1].

### 1.1. Historie 3D tisku

Charles Hull, spoluzakladatel 3D systémů, zahájil vývoj 3D tisku. Vynalezl stereolitografii - proces, který produkoval hmatatelný 3D objekt z digitálních dat. Tato technologie se používá k vytvoření 3D modelu z obrázku, kde uživatelé mohou testovat design předtím, než výrobek může jít do sériové výroby. Ušetří se jak čas, tak investice za formy a materiál [1].

### 1.2. Vývoj 3D tisku

*1992* – SLA (stereolithographic apparatus) první stroje používající 3D systém. Proces zahrnoval fotopolymer ztuhující se UV laserem. Fotopolymer měl barvu podobnou medu a byl vysoce viskózní. Tímto procesem byly utvářeny trojrozměrné objekty vrstvu po vrstvě. První stroj byl nedokonalý, ale slibný, neboť mohl vyrábět velmi složité součásti.

*1999* - 3D tisk přispěl novými technologiemi v medicíně, pomocí pěstovaných orgánů. Vědci z Wake Forest Institute for Regenerative Medicine vyvinuli první laboratorně vypěstovaný orgán pomocí 3D tiskárny. Používali syntetický skelet potažený buňkami pacienta. Tento proces neměl téměř žádné riziko pro odmítnutí příjemce, protože se prováděl s buňkou pacienta. To dalo cestu k vývoji nových strategií pro pěstované orgány.

*2002* - Vědci vytvořili mini-funkční ledvinu, která byla schopná filtrovat krev a produkovat zředěnou moč u zvířete. Tento vývoj vedl k větším cílům při výrobě orgánů a tkání pomocí technologie 3D tisku.

*2005* - Dr. Adrian Bowyer odstartoval projekt RepRap, jehož cílem byla iniciativa k vytvoření open-source 3D tiskárny, která dokáže tisknout většinu svých vlastních komponentů. Cílem projektu bylo distribuovat levné jednotky RepRap tak, aby jednotky byly schopné vytvářet své vlastní náhradní součásti.



2006 - byl vyroben první stroj SLS (selektivní laserové slinování). Stroj SLS využívá laser ke 14Kspojení materiálů a vytváření 3D produktů. Tento vývoj připravil cestu pro obrovské přizpůsobení průmyslových dílů a protéz, a také pro vyžádání jejich výroby. Ve stejném roce byl vytvořen stroj schopný tisknout více materiálů, včetně elastomerů a polymerů. Uvedený stroj také umožnil, aby jedna část byla vyrobena s různými hustotami nebo materiálovými vlastnostmi.

2008 - První tiskárna reprodukcující sama sebe vstoupila do života a umožnila uživatelům vytvářet další tiskárny pro členy rodiny nebo pro přátele. Ve stejném roce první osoba s 3D vytištěnou protetickou nohou začala chodit. Všechny části nohy, koleno, chodidlo a jamka byly vytištěny ve stejně složitém tvaru jako původní noha.

2009 - DIY 3D tiskárny se dostaly na trh. Ve stejném roce Dr. Gabor Forgacs použil 3D biotisk pro tisk první krevní cévy.

2010 - Inženýři na University of Southampton – konstrukce a letectví, vytiskli první letadlo pomocí 3D tiskárny na světě. Letadlo bylo vyrobeno pouze za 5 dní s rozpočtem £5,000 (liber).

2011 – „Urbee“, první auto vyrobené pomocí 3D tisku, na světě. Je elegantní, šetrné k životnímu prostředí a je navrženo tak, aby bylo úsporné a levné. Ve stejném roce nabízí 3D tisk službu tisknout 14 karátové zlato a stříbro jako materiály, což je levnější volba pro šperky složitých tvarů.

2012 – Lékařský profesionál z Nizozemska použil 3D tiskárnu k vytvoření spodní čelisti pomocí trojrozměrného skenu, která byla implantována 83 leté ženě trpící chronickou kostní infekcí.

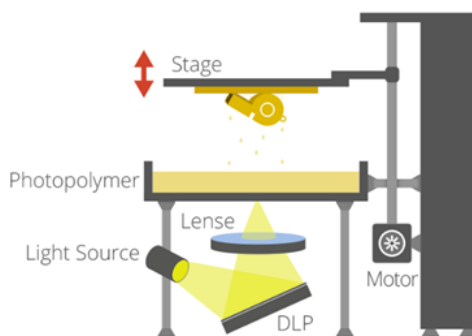
### 1.3. Různé technologie v 3D tisku

#### 1.3.1. Stereolithography (SLA)

Stereolitografie (SLA) - Tato metoda 3D tisku je první metodou v historii 3D tisku. Je sice nejstarší, ale stále se používá. Většina technik tisku používá pro zpracování objektu CAD soubor, který je pak převeden do formátu, který může tiskárna pochopit. V této technologii software zpracovává CAD model a generuje soubor STL, který obsahuje informace pro každou vrstvu. Celý proces zahrnuje následnou vrstvu tisku. Na každý milimetr může být až deset vrstev. Po vytištění všech vrstev musí být předmět opláchnut rozpouštědlem a umístěn v ultrafialové troubě, aby se proces ukončil [2].

#### 1.3.2. Digital Light Processing (DLP)

DLP je podobná stereolitografii. Larry Hornbeck z Texas Instruments vytvořil tuto technologii v roce 1987. Je oblíbený při výrobě projektorů a je použitelný i pro mobilní telefony a 3D tisk. Technologie DLP používá digitální mikro zrcadla, která jsou umístěna na polovodičovém čipu. Přestože DLP a SLA pracují s fotopolymery, používají různé zdroje světla. DLP používá více konvenčních zdrojů, jako obloukové lampy, jak lze vidět na obr. 1.1. Kromě toho používá DLP panel s tekutými krystaly, který je aplikován na celý povrch stavebního materiálu. Materiál pro tisk je tekutá plastová pryskyřice umístěná v průhledné nádobě. Pryskyřice se rychle vystaví působení velkého množství světla. Ve srovnání s SL, DLP vytváří robustnější 3D objekty s vynikajícím rozlišením v menším časovém intervalu. Využívá také menší množství materiálu, který vede k nižším nákladům a nižšímu množství odpadu [3].



Obr. 1.1. Schéma Digital Light Processing tiskárny [4]

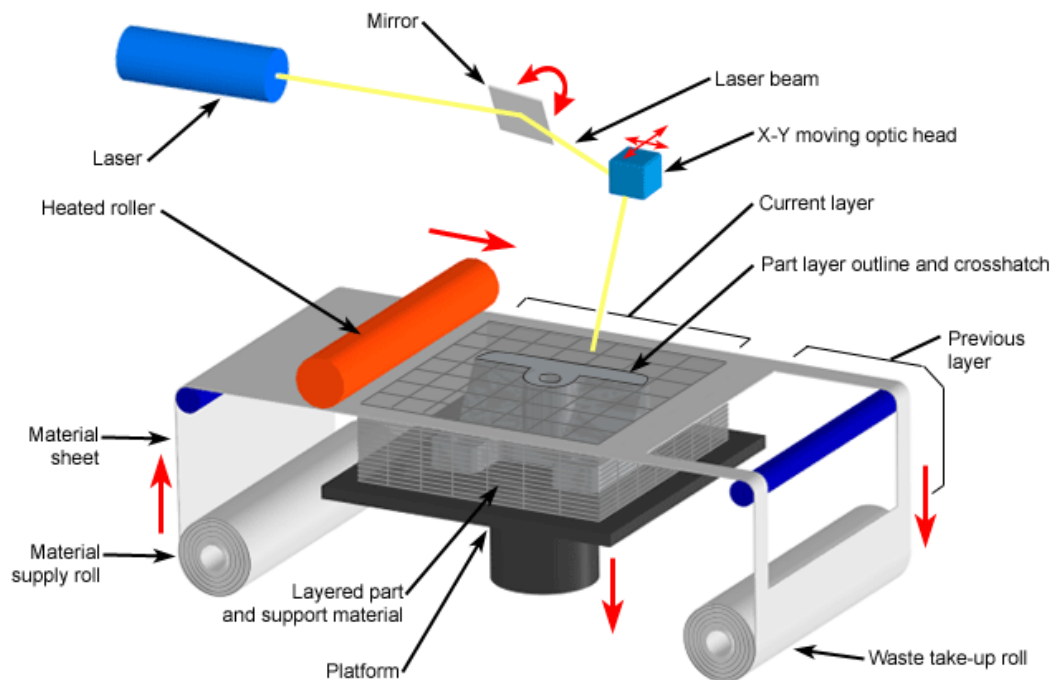
### **1.3.3. Fused deposition modeling (FDM)**

FDM je nejrozšířenější technologie 3D tisku. Umožňuje tisk koncepčních modelů a konečných produktů pro konečné použití s termoplasty z technického hlediska. FDM je jediná technologie 3D tisku, která vyrábí součásti z termoplastu, které produkují vynikající mechanické, tepelné a chemické vlastnosti, což je velmi užitečné a přitažlivé pro výrobce a inženýry. Technologie FDM vytváří vrstvu 3D objektů vrstvou od dolní části do horní části topením a vytlačováním termoplastického vlákna. Celý proces je podobný stereolitografii, ale pomalejší. Tato technologie využívá speciální software k řezání modelu CAD do vrstev a výpočtu způsobu, jakým vytlačovací stroj vytlačuje každou vrstvu. Tiskárna zahřeje termoplast až na teplotu tání a vytlačuje tryskou na základnu, aby vytvořila platformu po vypočtené dráze. Počítač překládá rozměr objektu do souřadnic X, Y a Z, a ovládá trysku a základnu tak, aby tryska sledovala vypočtenou dráhu ze souřadnic. Tato technologie se používá v automobilových společnostech, jako jsou Hyundai a BMW, a potravinářské společnosti včetně Nestlé a Dial. Technologie FDM je jednoduchá a může vytvářet složité geometrie a dutiny. Navíc je šetrná k životnímu prostředí [3].

### **1.3.4. Laminated Object Manufacturing (LOM)**

Helisys Inc., společnost se sídlem v Kalifornii, vyvíjí tento rychlý prototypový systém. Během procesních vrstev LOM papíru opatřeného lepidlem jsou plasty nebo kovové vrstvené materiály vzájemně spojeny teplem a tlakem. Pak jsou řezány do tvarů počítačem řízeným laserem nebo nožem. Post-zpracování 3D tištěných dílů zahrnuje obrábění a vrtání. Tato technologie také začíná pomocí souboru CAD, který je později převeden do formátu STL nebo 3DS. Tiskárny LOM používají nepřetržitou fólii potaženou lepidlem a vrstvou křížového podkladu s vyhřívaným válečkem. Vyhřívaný válec je veden přes vrstvy materiálu na substrátu, který taví lepidlo, a laser nebo nůž bude následně sledovat jeho požadovaný rozměr. Po dokončení vrstvy se pohybuje dolů a zpracovává se nový list. Proces se opakuje, dokud není 3D objekt plně vytištěn. LOM není tak populární, ale je jednou z cenově nejdostupnějších a nejrychlejších technologií 3D tisku. Navíc je tisk levný, protože nepoužívá drahé materiály. 3D tisk je velmi kreativní a užitečná technologie. Má potenciál vytvořit téměř cokoli, čímž se může dosáhnout velmi dobrého pokroku ve strojírenských a lékařských oborech [3]. Na obr. 1.2. můžete vidět schéma tiskárny (LOM)





Copyright © 2008 CustomPartNet

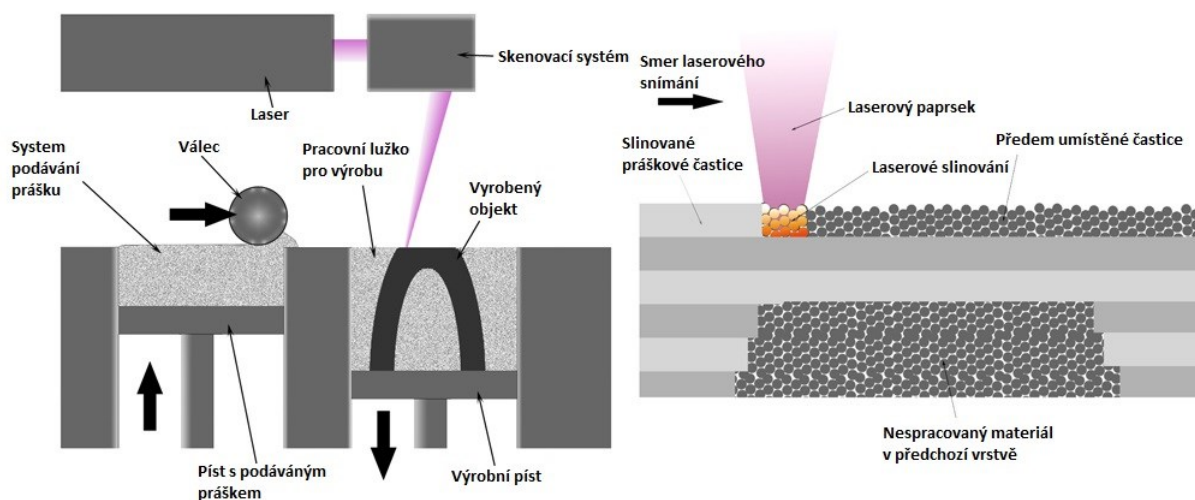
Obr. 1.2. Schéma Laminated Object Manufacturing [5].

### 1.3.5. Selective Laser Sintering (SLS)

Tato technologie používá laser jako zdroj energie pro vytváření 3D objektů. Carl Deckard, student Texaské univerzity a jeho profesor Joe Beaman, objevili tuto technologii v roce 1980. SLS má podobnost se SLA, ale liší se v použitém materiálu. SLS používá namísto kapalné pryskyřice práškový materiál. Navíc SLS nepoužívá žádné podpurné struktury, protože tištěný objekt je již obklopen nezasazeným práškem. Stejně jako ostatní technologie začíná SLS vytvořením souboru CAD, který se pak pomocí speciálního softwaru převede do formátu .stl. Tato technologie umožňuje používat materiály: nylon, keramiku, sklo a kovy jako hliník, ocel nebo stříbro. Díky své široké škále materiálů je SLS oblíbená pro přizpůsobení 3D objektů [3].

### 1.3.6. Selective laser melting (SLM)

Tato technika také používá CAD-data a vytváří 3D objekt pomocí laserového paprsku s vysokým výkonem, který spojí a roztaví kovové prášky. Několik zdrojů považuje SLM za podkategorii SLS, ale obě technologie mají zásadní rozdíly. SLM procesy plně roztaví kov do pevných 3D dílů, na rozdíl od SLS, který kovový prášek pouze nataví a ten se spojí pouze povrchově. Na obrázku 1.3. lze vidět schéma SLM/SLS. SLM také používá CAD soubor a speciální software k rozřezání CAD modelu do 2D vrstev. Po načtení souboru bude software tiskárny přiřazovat parametry a hodnoty pro konstrukci cesty. Jemný kovový prášek je rovnoměrně rozložen na desku a do ní je nasměrována vysoká laserová energie, aby se spojila každá vrstva obrazu 2D vrstvy. Energie je tak silná, že kovový prášek se taví a tvoří pevný předmět. Proces se opakuje pro další vrstvu, dokud není produkt dokončen. SLM používá následující kovy: nerezová ocel, titan, chrom kobalt a hliník. SLM je široce používán v objektech se složitými geometriemi a strukturami s tenkými stěnami a skrytými dutinami nebo kanály [3].



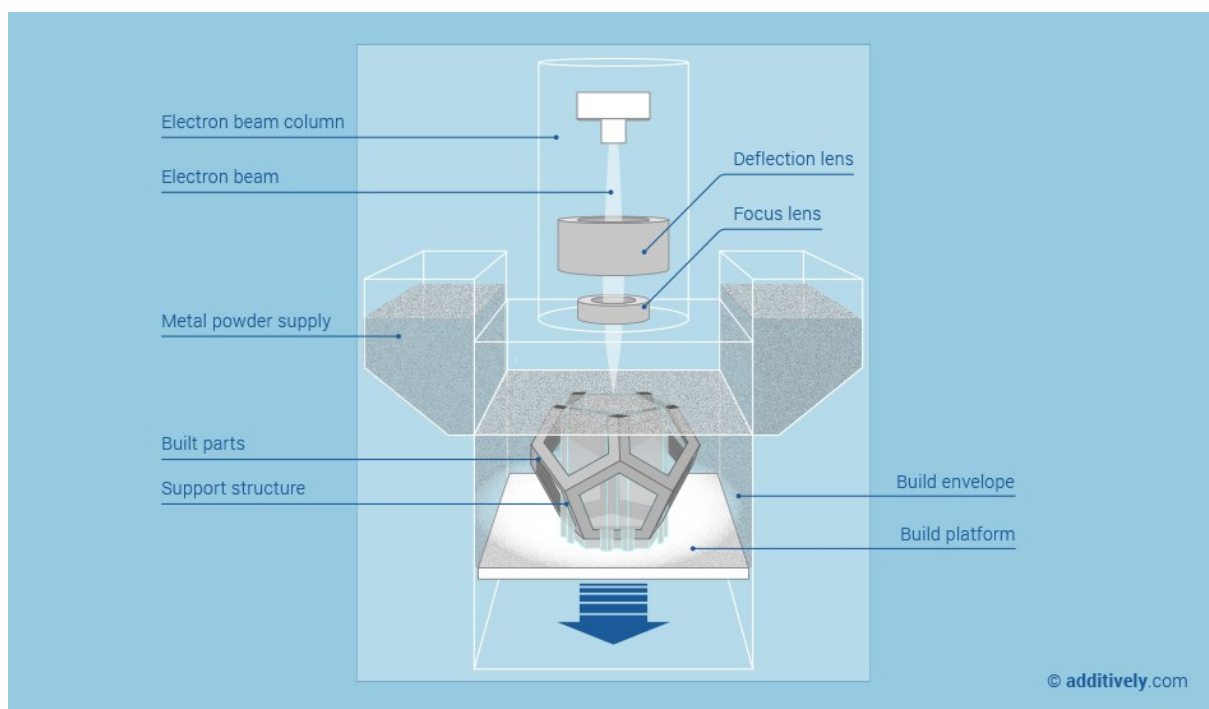
Obr. 1.3. Schéma Selective laser melting /Selective laser sintering [6].

Technologie SLM se dá použít jak pro výrobu plnohodnotných prototypových součástí, tak i k sériové výrobě. Při natavování prášku laserem, se materiál spéká a formuje do celku. V důsledku toho je proces tavení laserem doprovázen vývojem zbytkových napětí, které vznikají z vysokých teplotních gradientů přítomných v materiálu. Tato napětí může vést k porušení součástí v důsledku deformací, delaminací nebo prasklin. Vedle tepelného namáhání je tlumící

Poslední diskutovaný jev je účinek odpařování, který je zaznamenán, když je práškové lůžko ozařováno vysokou intenzitou energie. Část materiálu se vysokou teplotou tavení odpařuje [10].

### 1.3.7. Electronic Beam Melting (EBM)

Tato technologie je dalším typem výroby aditiva pro kovové součásti. Je podobná SLM, neboť také používá techniku fúze práškového lůžka. Místo použití laserového paprsku s vysokým výkonem jako zdroje energie, však používá elektronový paprsek - jak lze vidět na obrázku 1.4. To je hlavní rozdíl mezi oběma technikami, zbytek procesu je stejný. EBM je pomalé a nákladné ve srovnání s SLM. Také materiály jsou omezené. Většina použitých materiálů je komerčně čistý titan, Inconel 718 a Inconel 625. Tato technologie se zaměřuje na lékařské implantáty a letecký průmysl [7].



Obr. 1.4. Schéma Electronic beam Melting [8].

### **1.3.8. Kovové 3D metody založené na oblouku (Arc-based metal 3D printing methods)**

Metody 3D oblouku založené na oblouku jsou příklady DED. V těchto procesech je vytvořen elektrický oblouk mezi základním materiálem a spotřební tyčí, obsahující výchozí materiál. Tyč je úplně roztavena a přiváděna do tavicího bazénu, aby vytvořila svarový záchyt. Existuje několik variant, včetně stíněného obloukového svařování (SMAW), svařování plynem s kovovým obloukem (GMAW), nanášením tvarovaného kovu (SMD), 3D mikrovlnám (3DMW) a plazmovým obloukovým svařováním (PAW) [9].

### **1.3.9. Ultrazvukové metody svařování založené na 3D metodách**

Ultrazvuková AM (UAM) je inovativní proces, který využívá tenké (150  $\mu\text{m}$ ) kovové pásky jako surovinu pro výrobu komplexních konstrukcí kombinací ultrazvukových svařovacích švů a přerušovaného obrábění. Proces UAM byl modifikován pro tvorbu malých rozměrů a také pro materiály, které je obtížné spojit, tím, že naruší jejich povrch. Třením působícím s ultrazvukem vytvoří spoj podobný svarovému. Výhodou této metody je že dokáže spojit i materiály které jsou teplotně citlivé. Materiál je spojován při teplotě, než je 0,5 teploty tání kovu [9].

## 2. Materiály připravované 3D tiskem

Materiálů pro 3D tisk je celá škála. Materiály se dají rozdělit do dvou hlavních odvětví, a to na polymerní materiály a materiály kovové (kovové prášky). Další dělení těchto hlavních skupin je závislé na technologii, kterou byl materiál v 3D tiskárně použit.

Trojrozměrný (3D) tisk kovových materiálů zahrnuje vrstvou konsolidaci vstupních surovin ve formě prášku, drátu nebo plechu s využitím různých zdrojů energie pro vytvoření komplexních tvarů. Během posledních dvou desetiletí došlo k výraznému pokroku v oblasti, a to jak v oblasti technologií, tak i v oblasti materiálů pro 3D kovový tisk. To vedlo k rozsáhlému průzkumu a zavádění technologií mezi průmyslovými, akademickými a výzkumnými a vývojovými organizacemi [9].

Potenciál pro výrobu kovových komponent přímo z digitálních dat pomocí jediného kusu plně automatizovaného zařízení a surovinových materiálů a bez přídavných tvrdých nástrojů, je velmi významný. Okamžité krátkodobé dopady zahrnují dramatické snížení nákladů a doby realizace, schopnost vyrábět drobné nebo "jedinečné" komponenty na vyžádání, a schopnost vytvářet a vyrábět pokročilé, vysoce výkonné a efektivnější komponenty, které nemohou být vyrobeny konvenčními způsoby kvůli vlastním omezením geometrie, materiálu, mikrostruktury a vlastností [11]. Tyto výhody byly uznány a 3D kovový tisk je dnes používán k omezené výrobě průmyslem, výzkumnými a vývojovými institucemi, a vládami po celém světě. Zatímco výhody 3D kovového tisku jsou přesvědčivé, existují také významné vědecké a technické problémy, které nedovolují rozsáhlou implementaci a přijetí těchto technologií. Zaprvé, mikrostruktury a krystalové struktury vytvořené vrstvou konsolidace aditiv jsou zcela nové a zřídka připomínají ty, které se vyrábějí běžnými způsoby výroby, jako je odlévání nebo deformace. Za druhé, fyzikální procesy spojené s přírůstkovou konsolidací kovů doprovázené různými variacemi výchozích surovin, parametry zpracování, protokoly zpracování a architekturami zařízení, jsou samy o sobě složité, což vede k rozmanitosti mikrostruktur a vlastností "jak se vyrábějí". Za třetí, komplexní chápání strukturních a mikrostrukturních defektů, přítomných v kovu, zpracovaném pomocí 3D tisku a následném tepelném zpracování (pro zmírnění těchto defektů) je omezené. Proto je důležité intenzivnějšího výzkumu a vývoje v této oblasti[9].

## 2.1. Materiály a materiálové systémy pro 3D tisk

Různé druhy kovových materiálů byly zpracovány pomocí 3D kovového tisku. Jedná se o čisté kovy (zlato, měď, niob, tantal, titan), práškové slitiny (na bázi hliníku, na bázi kobaltu, na bázi mědi, na bázi železa, na bázi niklu a titanu, jako jsou Ni-Al, Ti-Ni, Ti-Mo a Ti-V) [12]. Čisté kovy zpracované prostřednictvím kovového 3D tisku zahrnují titan zpracovaný prostřednictvím LS, LM a LMD, tantalové prostřednictvím LMD, zlato přes SLM, měď přes LM a EBM, a železa a niobu prostřednictvím EBM t. Na kovovém 3D tisku s práškovými slitinami je založeno velké množství výzkumu [13]. Systémy slitin zahrnují ty, které jsou založeny na Al-, Co-, Cu-, Fe-, Ni- a Ti- a většina zpracování probíhá pomocí LM nebo LMD hliníkové slitiny, včetně Al-40Ti-10Si, 34 Al-Si-10Mg a Al-15Cu, slitiny na bázi kobaltu zahrnují Co-29Cr-6Mo zpracované pomocí SLM, Co-26Cr-6Mo-0.2C přes EBM a řadu slitin zpracovávaných laserem (DED, jak se aplikuje na pokovování dalších konstrukcí) [14]. Zpracované slitiny na bázi mědi obsahují speciální slitinu na bázi Cu a Cu-30Ni zpracované přímým uložením kovu. Slitiny na bázi železa, které byly zpracovány, zahrnují nerezové oceli, nástrojové oceli a legované oceli pomocí LM, LMD a EBM. Široká škála super-slitin na bázi niklu byla zpracována různými kovovými metodami 3D tisku. Slitiny IN625 a IN718 obdržely velkou pozornost metodami zpracování včetně přímého selektivního slinování laserem, SLM, LMD a EBM. Řada takzvaných "nevařitelných" super-slitin na bázi niklu, pro použití v horkých částech plynových turbín, byla také úspěšně zpracována metodami SLM, skenovací laserovou epitaxií (SLE), LMD, EBM a SMD. Například SLM byl použit pro zpracování Waspalloy, MAR-247 a CM247LC, zatímco SLE byl použit pro zpracování IN100, René 80, MAR-M247, René 142, CMSX-4 a René N5. Různé procesy LMD byly aplikovány na slitiny za horka. DMD byla použita k vytvoření ložisek René N4 68 a René N5. LMD byla použita pro výrobu komponentů v René 41. Proces LENS byl použit k výrobě slitin IC221W a ELMF, zatímco podobný postup byl použit k ukládání monokrystalů CMSX-4. Pro výrobu vzorku bez slitin IN100 byl použit proces LMD podporovaný mikroskopem. Bylo prokázáno, že svařování laserovým práškovým práškem vytváří usazeniny ve slitině MAR-M002. Proces EBM byl použit k výrobě struktur v René 142 74 a CMSX-4. Titanové slitiny byly zpracovány různými technikami, které se převážně provádějí na Ti-6Al-4V. Dále byly zkoumány slitiny jako Ti-24Nb-4Zr-8Sn, Ti-6Al-7Nb a Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si a aluminidy titanu [15].

## 2.2. Mikrostruktura a vlastnosti

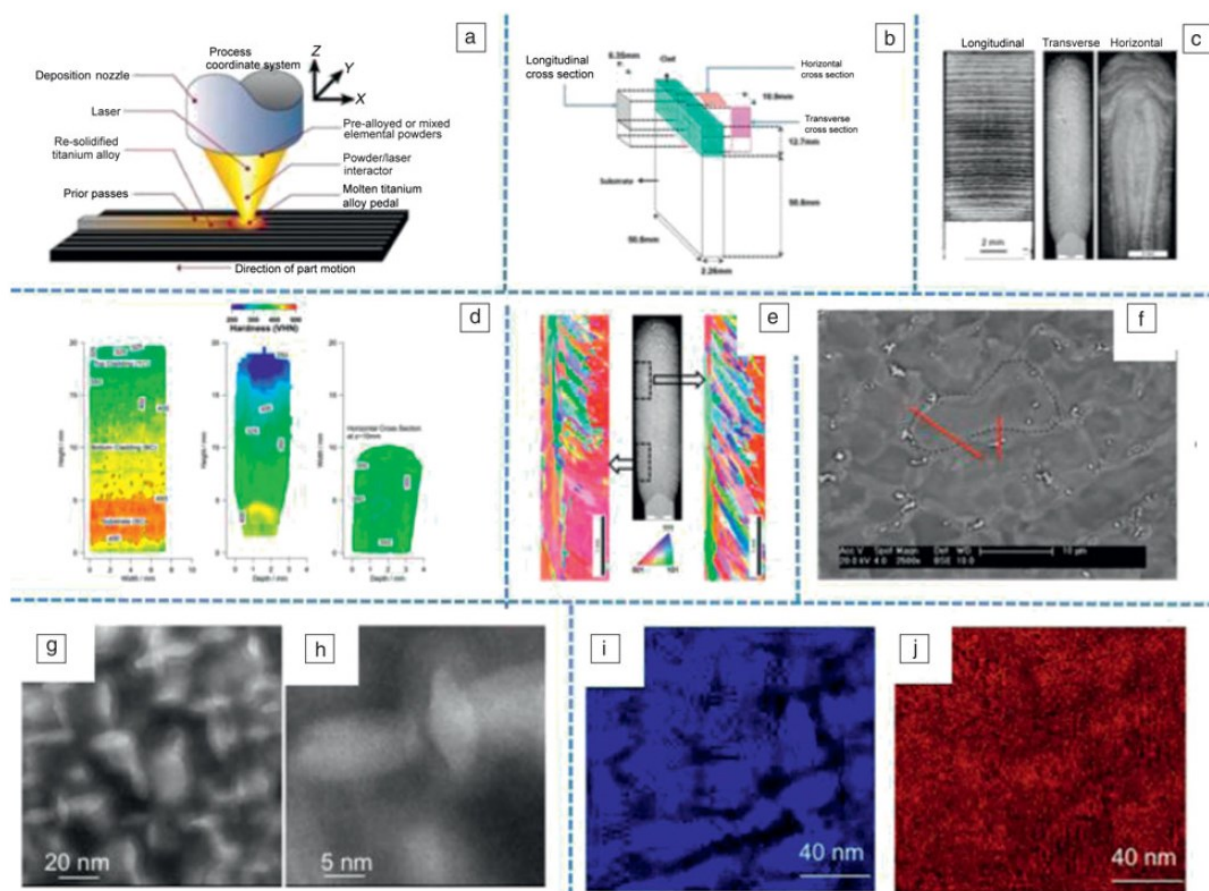
Fyzikální procesy, které řídí evoluci mikrostruktury během procesů kovového AM (ADDITIVE MANUFACTURING), lze pochopit pomocí znalostí z tavného svařování, svařování v pevné fázi a práškové metalurgie. Všechny procesy AM, které se spoléhají na tavení (jako jsou DED, EBM a SLM), používají pohyblivý zdroj energie na kovovém substrátu nebo práškovém loži, což vede k opakovanému roztavení, tuhnutí a tuhému stavu transformace, protože každá vrstva je uložena. Je zajímavé, že tento stav je podobný vícenásobnému svařování. Kontrola mikrostruktury během ultrazvuku AM je definována termomechanickou deformací s vysokou deformací napříč dosedacími rozhraními, která je podobná svařování v pevné fázi. Kromě toho jsou fyzikální procesy při proudění pojivového paprsku podobné jako při vstřikování kovů, které je součástí technologie práškové metalurgie [16]. Existuje podobnost ve vývoji mikrostruktury v kovovém kovu AM a svařování. Mnohé nezávislé proměnné (např. výkon, rychlost, přehřívání, plynové stínění), které jsou společné pro svařování, jsou rovněž důležité pro kov AM s dodatečným stupněm volnosti. Například kovové zařízení AM často mění prostorové polohy (tj.  $x$ ,  $y$ ) zdroje energie tím, že změní polohu skenování na každé vrstvě v závislosti na geometrickém průřezu daném počítačovou konstrukcí. Tyto složité okrajové podmínky vedou k velmi přechodným podmínkám přenosu tepla a hmoty, a výsledkem jsou mikrostrukturální heterogenity v objemu stavby [17]. Tyto heterogenity pokrývají stupně nano až makro-délky a často vyžadují podrobnou charakterizaci. Jeden příklad takových dat z konstrukce super-slitiny na bázi niklu (IN718) vyrobeného DED procesem je znázorněn na obr. 2.1.

Vzhledem k prostorovému pohybu zdroje energie, ke směru budování ( $x$  -,  $y$  - a  $z$  - směry), je často nutné charakterizovat stavbu v různých částech (tj. podélné, příčné a vodorovné viz obrázek 2.1.b). Optická mikroskopie těchto částí ukazuje komplexní povahu tvaru roztaveného bazénu v každé vrstvě (viz obr. 2.1.c), podobně jako u vícevrstvého svařování. Tyto změny vedou k významné mechanické heterogenitě měřené mapováním tvrdosti (viz obr. 2.1.d). Následná charakterizace ukázala velké rozdíly v krystalografické struktuře ovlivněné prostorovými změnami tvaru roztavené taveniny, teplotním gradientem ( $G$ ) a rychlostí rozhraní kapalina-pevná látka ( $R$ ), která následně přepíná režim tuhnutí od vytváření sloupcového k rovnovážnému zrně (viz obrázek 2.1.e). Je zajímavé, že krystalografická heterogenita neodpovídá mechanické heterogenitě. Další podrobná analýza byla provedena za použití snímání a přenosové elektronové mikroskopie (SEM a TEM). SEM potvrdila chemické nehomogenity způsobené zrychleným tuhnutím (viz obr. 2.1.f). TEM potvrdil přítomnost  $\gamma''$

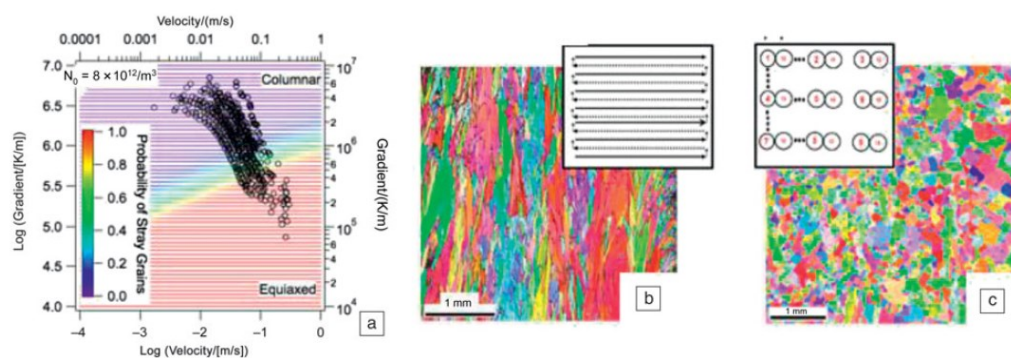
fáze (viz obr. 2.1.g-j) se souvisejícím obohacením niobu. To je skutečně neočekávané, protože  $\gamma''$  se často vytváří po prodlouženém stárnutí při vysoké teplotě. Mapa energetické disperzní spektroskopie pro Al vykazuje slabou korelaci s  $\gamma''$  precipitáty. Toto zrychlené srážení bylo korelováno s předpokládanými tepelnými oblouky v teplotním rozmezí 600 až 1000 K. Na základě předchozích diskusí je zřejmá otázka: Můžeme řídit vývoj mikrostruktury v AM pomocí výpočetního modelování a inovativních kontrol procesů? Raghavan a kol. nedávno odpověděla na tuto otázku pomocí procesu EBM AM. Nejprve byla zavedena novátorská kontrola procesu v zařízení, která umožňuje operátorovi měnit podmínky tavení z lineární linky na bodový režim. Poté byly navrženy podmínky využívající lineární a bodové roztavené vrstvy, které posunuly G (tepelný gradient) a R (rychlosti rozhraní kapaliny) ke střídání mezi sloupcovými nebo rovnoběžnými přechodovými oblastmi pomocí vysoce výkonného výpočetního nástroje (viz obrázek 2.2.a). Při těchto podmínkách zpracování bylo na požádání dosaženo stavby s převážně sloupcovou (viz obr. 2.2.b) nebo rovnoběžnou (viz obr. 2.2.c) mikrostrukturou [18]. To bylo provedeno s omezenou experimentální optimalizací zkušebních a chybových hlášení. Předchozí ukázka vede k další otázce: Je možné použít parametry procesu založené na modelu pro dosažení optimalizované nízkoteplotní mikrostruktury? Makiewicz a kol. tuto otázku řešila. Je dobře známo, že konstrukce Ti-6Al-4V vyrobené procesem DED často vedou ke špatným únavovým vlastnostem v z-směru. Tento jev může být korelován s mechanickými (viz obr. 2.3.a) a mikrostrukturálními heterogenitami (viz obr. 2.3.b). V tomto příkladu horní oblast stavby převážně obsahuje mikrostrukturu basketweave (viz klíče pro mikrostruktury na obr. 2.3.c), zatímco spodní oblasti obsahovaly mikrostrukturu kolonie [19]. Tento prudký přechod byl racionalizován na základě tepelných exkurzí v těchto oblastech, které byly předpovězeny pomocí výpočetního modelu. Většinu času zůstávají horní oblasti stavby při teplotách vyšších než je teplota  $\beta$ -přechodu (teplota, nad kterou se vytváří jediná BCC  $\beta$ -fáze) a výsledná mikrostruktura se během ochlazování vyvine z této vysoké teploty po dokončení stavby. Naproti tomu spodní oblasti procházejí cyklickými tepelnými výkyvy pod teplotou  $\beta$ -translace (viz obrázek 2.3.d). Tímto chápáním byla navržena nová sada parametrů zpracování, která umožňovala, aby byly všechny oblasti sestavení vyšší než teplota p-transferu během celého procesu sestavení. To vyžadovalo úzkou kontrolu parametrů zpracování jako funkce výšky sestavení, přičemž se zabráňovalo přehřátí roztaveného kovu. Při takové kontrole procesu byla získána homogenní mikrostruktura (viz obr. 2.3.e). Taková homogenní mikrostruktura vedla ke zlepšení únavových vlastností. Přestože příklady ukazují příslib získání mikrostrukturní kontroly ve fázi zpracování, běžné defekty na bázi kovu AM, jako je poréznost



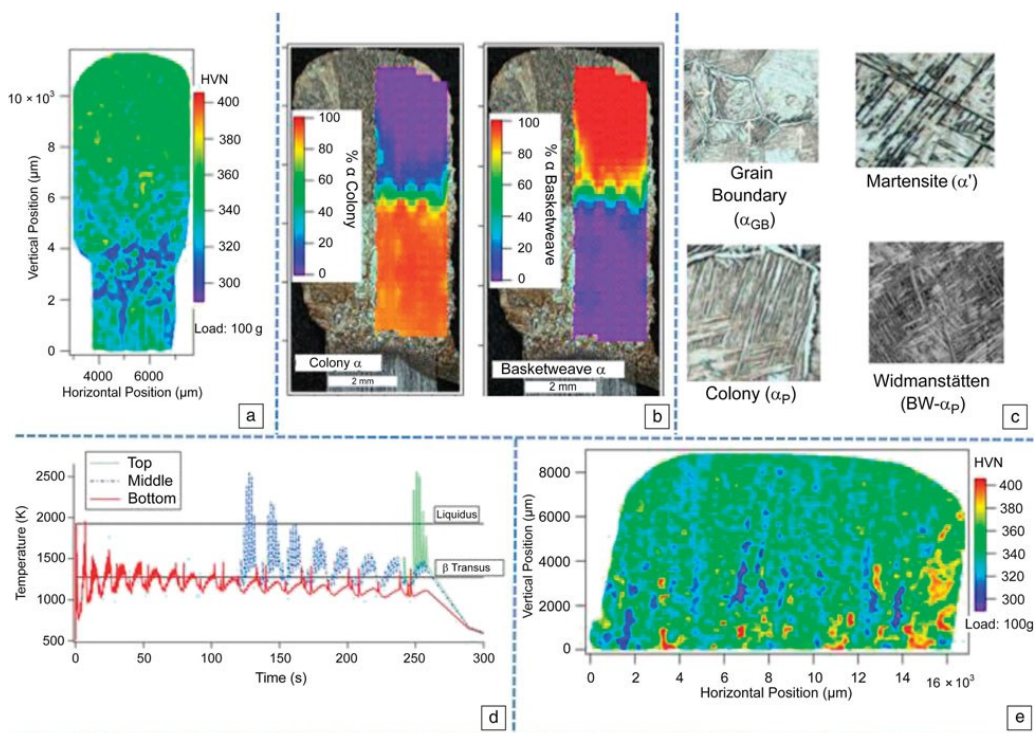
a nedostatek fúze, stejně jako optimalizace mikrostruktury, mohou vyžadovat další post-processing, jako je například izostatické lisování za tepla (HIP) [9].



Obrázek 2.1. (a) Schematické znázornění procesu přímého ukládání energie. Tento postup byl použit k výrobě pláště na substrátu slitiny IN718, následované podrobnou charakterizací prováděnou na různých částech uvedených v (b). (c) Makrostruktura znázorňující známky strategie ukládání v různých průřezech ze vzorku uvedeného v písmenu b). (d) Mapování tvrdosti bylo provedeno napříč všemi průřezy a vykazovalo signifikantní mechanickou heterogenitu. (e) Kromě toho byla krystalografická heterogenita v příčném řezu měřena za použití elektronového difrakčního zobrazování. (f) Skenovací elektronová mikrofotografie zobrazující heterogenitu legujících prvků v dendritech z důvodu pevnosti v pevné fázi. (g-h) Obrázek transmisního elektronového mikroskopu s vysokým rozlišením, který ukazuje přítomnost mikrostruktury  $\gamma''$  v rámci zrna  $\gamma$ . Identifikaci  $\gamma''$  precipitátů byla dále potvrzena spektroskopií (i-j) s vysokým rozlišením, která vykazovala přítomnost (i) vysoké koncentrace niobu a (j) koncentrací difuzního hliníku [9].



Obrázek 2.2. Kontrola ztuhlé struktury uvnitř tavení elektronových paprsků vytváří: (a) Solidifikační mapa, která předpovídá pravděpodobnost zbloudilých zrn a sloupcovitých zrn. Symboly kruhu označují podmínky, kterých lze dosáhnout při tuhnutí v procesu tavení elektronového paprsku. Při těchto podmínkách zpracování, které vedou k lineárním a bodovým taveninám, bylo dosaženo struktury sloupcovitých a (c) rovnoběžných zrn v celé konstrukci [9].



Obrázek: 2.3. (a) Mapa tvrdosti ukazuje heterogenitu vrstev Ti6Al4V z horní části dna provedeného procesem usměrňování energie. (b) Tato heterogenita byla korelována s náhlou změnou z basketweave (BW) na mikrostrukturu kolonie. (c) Klíčové mikrofotografie pro různé mikrostruktury očekávané od Ti6Al4V jsou uvedeny. (d) Změna mikrostruktury uvedená v (b) byla korelována se změnou tepelných cyklů. (e) Mapa tvrdosti ukazuje srovnatelně méně mechanickou heterogenitu s novými podmínkami zpracování navrženými výpočetními modely [9].

### 2.3. Mechanismus teplotního gradientu

Mechanismus teplotního gradientu (TGM) je běžně používán pro laserové ohýbání plechů podél přímky. Tento mechanismus je však také použitelný v SLM, kde působí na dříve zpevněné vrstvy ležící pod zpracovanou práškovou vrstvou. Díky rychlému zahřívání horního povrchu laserovým paprskem a poměrně pomalému vedení tepla, se vyvíjí strmý teplotní gradient. Pevnost materiálu se současně snižuje v důsledku zvýšení teploty. Rozšíření vyhřívané horní vrstvy ( $\epsilon_{th}$ ) se přemění na pružné a plastové tlakové napětí (viz obr. 1a), protože okolní materiál omezuje volnou expanzi. Když se dosáhne mezního zatížení materiálu (které je sníženo v důsledku vysoké teploty), horní vrstva (vrstvy) bude plasticky stlačena ( $\epsilon_{pl}$ ,  $\sigma_{comp}$ ). Při absenci mechanických omezení, dojde k vnímání počítadla ohýbajícího se od laserového paprsku. Během chlazení a smrštění, se plastické stlačené horní vrstvy smršťují více než spodní vrstvy a vyvíjí se úhel ohybu směrem k laserovému paprsku. Spojení mezi tímto TGM pro ohýbání laserem a procesem SLM lze nalézt. Podkladové ztuhlé vrstvy ve vzorku SLM jsou vystaveny srovnatelnému teplotnímu gradientu, jak je uvedeno v TGM při každém roztavení nové práškové vrstvy. Tímto způsobem se generované namáhání pokouší ohýbat konsolidované vrstvy směrem k laserovému paprsku, což může způsobit deformaci a porušení části delaminací nebo praskání. Kromě toho smrštění roztavené vrstvy (vrstev) během chlazení přidá další tahové napětí nahoru pod vrstvami, které jsou ovlivněny TGM. Pouze změna teploty pod bodem tání bude mít za následek dodatečné namáhání v nově nanesené vrstvě. Tato napětí také má tendenci ohýbat část směrem k laseru [10].

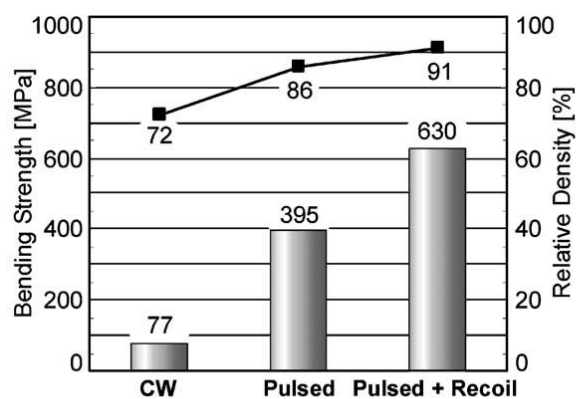
### 2.4. Různé procesní teploty

Jiná vnitřní napětí mohou být vyvolána časově se měnícími zpracovacími teplotami, které se mohou lišit v závislosti na geometrii dílů a použité strategii skenování. Dvě příčiny tohoto rozdílu lze uvést. Obecně se průřezy části skenují s vektory rovnoběžnými navzájem. Pokud je oblast, která má být skenována, malá, dochází ke krátké délce skenovacího vektoru. Sousední koleje se proto rychle skenují po sobě, což zanechává mezi sebou jen malý čas ochlazování, což vede k vysokým teplotám (viz obr. 1b). U větších ploch je délka dráhy laserového paprsku mnohem delší a následně skenované stopy mají více času k vychladnutí, což vede k nižší teplotě skenované oblasti. V důsledku toho dochází k horším vlhkostním podmínkám, což vede k nižší hustotě materiálu. Dalším důvodem pro různé teploty procesu lze vysvětlit rozdíl v tepelné vodivosti mezi volným práškovým lůžkem a ztuhlým materiálem.

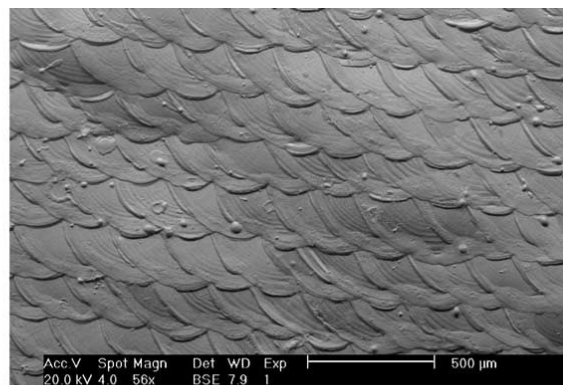
Během tavení laku práškového lože se hustota materiálu zvyšuje (například od 40 do 95% skutečné hustoty). Při skenování malých zón obklopených volným práškem je pravděpodobné, že v porovnání s velkými zónami, je kvůli izolaci obklopujícího prášku méně chladiče. To platí zejména pro zóny v rohu části. V těchto místech bude výsledkem vyšší teplota, což může vést k lepší smáčivosti a vyšší hustotě materiálu [10].

## 2.5. Mechanické vlastnosti

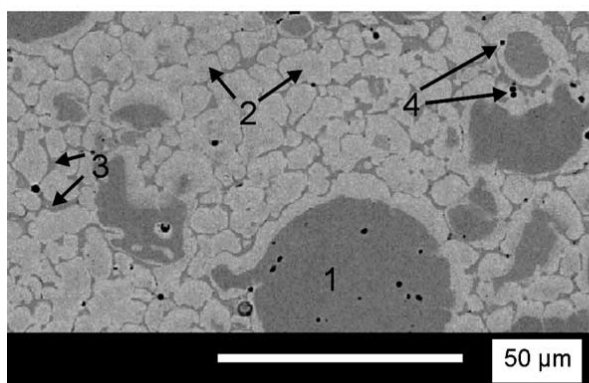
Mechanické vlastnosti součástí vyráběných ze SLM byly zkoumány a souvisely s parametry procesu. Hustota částí byla stanovena za použití metody "Archimedes" v ethanolu. Lze rozlišit tři hlavní laserové režimy: kontinuální režim, impulsní režim a impulsní režim s účinkem zpětného rázu. Jak bylo diskutováno, vede to k lepšímu propojení mezi vrstvami. Na obr. 2.4a lze vidět, že ačkoli rozdíl v relativní hustotě CW a impulsních částí není tak velký, rozdíl v síle je. To je způsobeno především špatným spojením mezi vrstvami, ke kterému dochází při snímání CW kvůli nedostatečnému špičkovému výkonu. Povrch částí vyrobených v režimu odpařování vykazuje vzorek podobný stupnici [20]. Na obr. 2.4b je znázorněn horní povrch části vyrobené s převážně překrývajícími se impulzy (pulzní vzdálenost = 0,17 mm, průměr laserového paprsku = 0,60 mm). Hodnoty drsnosti 10-30  $\mu\text{m Ra}$  (bez odpojení) byly získány pro předložené části SLM. Tyto velké hodnoty pocházejí z pulzních kráterů na jedné straně a kapiček materiálu, které byly na druhé straně vyfukovány a ztuhly jinde na povrchu dílu [21]. V závislosti na intenzitě píku byly získány různé typy mikrostruktur. Na obr. 2.4c je znázorněna mikrofotografie části naskenované s impulsním výkonem 300W. Je zřejmé, že nebylo dosaženo úplného roztavení, protože zůstaly viditelné nezmáčené částice Fe. Zvýšení impulzního výkonu přináší úplné tavení a částečné odpařování. Zrna mají silnou orientaci (obr. 2.4d), která křehčí materiál a usnadňuje tvorbu trhliny. Nicméně, jak bylo uvedeno výše, tyto vysoké meze intenzity vyvolávají velké tepelné namáhání, které způsobuje svislé trhliny v částech, když nejsou parametry procesu pečlivě vybrány [10].



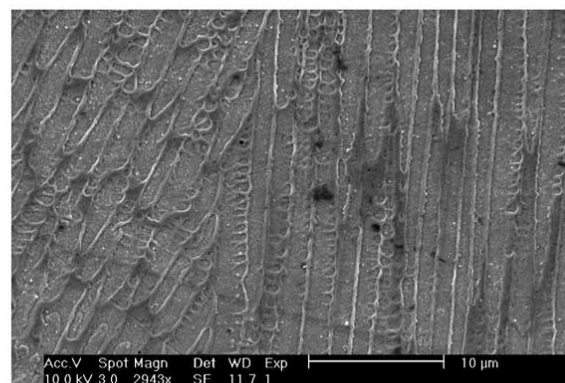
(a)



(b)



(c)

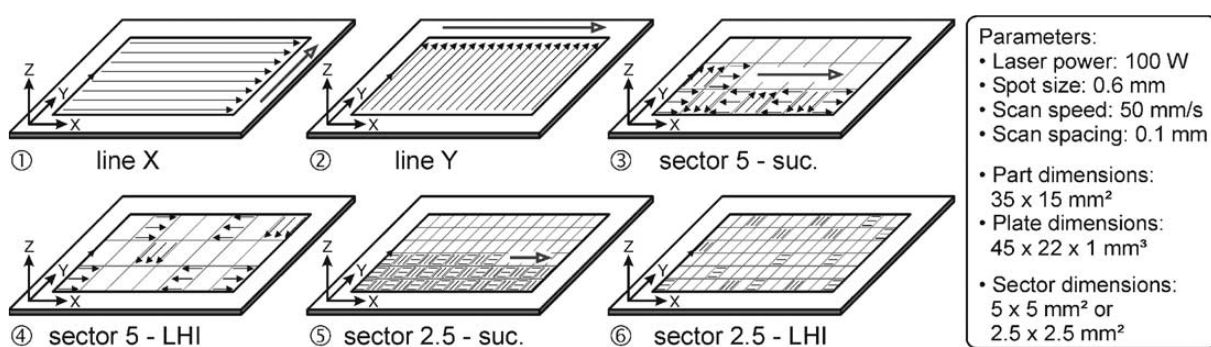


(d)

Obrázek 2.4. (a) Pevnost v ohybu a relativní hustota pro různé laserové režimy, (b) horní povrch částí naskenovaných s překrývajícím se impulzy, (c) mikrostruktura ukazující zbývající částice Fe, dendritickou fází s vysokou teplotou tání (d) mikrostruktura zobrazující typickou jemnou rychlou ztuhlou mikrostrukturu [10].

Byl proveden experiment, který prozkoumal chování výše uvedených jevů byly vzorky skenovány s různými skenovacími strategiemi a změřena jejich odchylka ve směru Z. Proto byly základní desky o rozměrech 45 mm × 22 mm vyříznuty z ocelového plechu o tloušťce 1 mm. Před provedením skenovacích testů byly desky bez zátěže žíhány v peci za redukční atmosféry. Na obr. 2.5. jsou znázorněny porovnávané strategie skenování a použité parametry. První dvě strategie skenování, řada X a Y, jsou modely, které se typicky používají v SLS / SLM. U ostatních čtyř strategií je část dílu rozdělena do malých obdélníkových sektorů 5 mm × 5 mm pro strategie (3) a (4), a 2,5 mm × 2,5 mm pro poslední dvě strategie. Pořadí, v němž jsou tyto sektory skenovány, může být po sobě následující, nebo podle nejmenšího tepelného vlivu mezi skenovanými sektory. Postupné pořadí skenování pro strategie (3) a (5) začíná řádkem X snímání sektoru v levé spodní části dílu. Další sektor (vpravo) je naskenován vzorem řádkem Y, další řádkem X atd. Také počáteční roh pro

linkový sken se pro následující sektory liší. Metoda LHI začíná v náhodně vybraném sektoru. Dále se skenuje sektor, který je nejméně vyhřívaný (tedy nejdále od posledního), a tak dále. Mezi následujícími sektory je orientace snímání čáry střídána mezi X a Y. Části jsou skenovány pod inertní atmosférou dusíku. Tato šestinásobná skenovací strategie je porovnávána během dvou druhů experimentů: (a) skenování přímo na základní desku a (b) roztavení jedné práškové vrstvy (150  $\mu\text{m}$ ) na základovou desku. Typ (a) byl zvolen tak, aby eliminoval rušivý vliv potenciální nerovnoměrné distribuce práškových částic ve vrstvě nebo nerovné tloušťky vrstvy. V případě, že (b) nebylo možné roztavit více vrstev na sebe.



Obrázek 2.5. Šest různých strategií skenování materiálu u 3D tisku [10].

## 2.6. Oceli AISI 316

Oceli s označením AISI 316 se řadí k austenitickým ocelím s vysokou odolností proti korozi. Dál se dá rozdělit na oceli 316, 316L a 316Ti v závislosti na chemickém složení materiálu.

**AISI 316L (1.4404)** kyselinovzdorná chrom-nikl-molybdenová ocel s nízkým obsahem uhlíku do 0,03. Je vysoce odolná proti koncentrovaným kyselinám jak organickým, tak i anorganickým, samozřejmě při dodržení nižší koncentrace a při střední úrovni teplot. Má výrazně zvýšenou odolnost proti všem typům koroze. Tato jakost má mírný sklon k důlkové korozi způsobené pnutím v roztocích chlóru. Je velmi dobře svařitelná. Její výhodou je, že po svařování si ocel zachovává svou vysokou odolnost proti mezi-krystalové korozi. Materiál AISI 316L se vyznačuje velice dobrými mechanickými vlastnostmi při lisování, ohýbání a tažení. Tato ocel se často používá v chemickém průmyslu, v zařízeních pro styk s mořskou vodou a pro výrobu bazénových doplňků viz. Tab 2.1 [22].



**AISI 316Ti (1.4571)** kyselinovzdorná chrom-nikl-molybdenová ocel, která je stabilizovaná přísadou titanu. Díky přísadě molybdenu má vyšší odolnost proti roztokům kyselin, zabraňuje vzniku rizika hluboké místní koroze a má vyšší mez kluzu i pevnosti. V důsledku stabilizace titanem není po svařování silnějších materiálů zapotřebí žádná tepelná úprava. Svařitelnost elektrickým obloukem je dobrá při použití všech metod svařování. Nelze svařovat plamenem. Díky přítomnosti titanu nelze tuto ocel leštit do vysokého lesku. Materiál AISI 316Ti se vyznačuje dobrými mechanickými vlastnostmi při lisování, ohýbání a tažení viz. Tab 2.2 [22].

Tab 2.1 Chemické složení ocelí 316 podle EN: [23, 24]

AISI	DIN	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	ostatní
		[hm %]						
316	1.4401	0,03	2,0	1,0	16,5-18,5	10,5-13,5	2,0-2,5	Ti $\geq$ 5 % C do 0,8
316	1.4436	0,05	-	-	16,5-18,5	11,0-14,0	2,5-3,0	-
316L	1.4404	0,05	2,0	1,0	16,5-18,5	11,0-14,0	2,0-2,5	-
316L	1.4432	0,03	-	-	16,5-18,5	10,5-13,0	2,5-3,0	-
316L	1.4435	0,03	2,0	1,0	17,0-18,5	12,5-15,0	2,5-3,0	S $\leq$ 0,025
316Ti	1.4571	0,08	2,0	1,0	16,5-18,5	10,5-13,5	2,0-2,5	Ti $\geq$ 5 % C do 0,8

Tab 2.2 Mechanické vlastnosti ocelí 316 [24, 25]

AISI	DIN	Rp0,002 [MPa]	Rm [MPa]	A%	C [J]
316	1,4401	>240	>700	>43	120
316L	1,4404	>240	<675	>43	-
316L	1,4435	>240	<670	>43	-
316Ti	1,4573	>270	<765	>37	-

### 3. Vlastnosti a využití 3D tištěných materiálů

Využití 3D tisku je spousta. 3D tisk materiálu je nejvíce využíván v lékařství, poté v kosmonautice a nakonec, až na třetím místě, je teprve automobilový průmysl. Ať už tomu tak je nebo ne, tak 3D tisk je využit převážně v prototypové výrobě a potom ve výrobě složitých dílů. Tím odpadá výroba licí formy a složité obrábění jistých tvarů. Naopak v 3D tiskárně se vyhotoví už funkční díl, který pak potřebuje jenom jemné doladění v podobě povrchové úpravy nebo obrobení funkčních ploch do finální podoby.

#### 3.1. Medicínské využití

Lékařské zobrazování se v posledních několika desetiletích dramaticky vyvinulo. S vývojem multidetektorové počítačové tomografie a zobrazování pomocí magnetické rezonance se radiační diagnostika stala méně invazivní a informativnější. Trojrozměrná obrazová data s vysokým rozlišením lze získat v jediném dechu. Zpracování obrazu hraje velmi důležitou roli v diagnostickém zobrazování. 3D vizualizace a navigace obrazu pomáhají být radiologii jednou z klíčových klinických disciplín. Dnešní obrazové operace ilustrují, jak se radiologie integruje do terapeutického týmu spolu s různými chirurgickými specialisty. Jsme však omezeni použitím plochých obrazovek pro vizualizaci trojrozměrných obrazových dat. Vznikající technika, označovaná jako 3D tisk nebo rychlé prototypování, překonává toto omezení tím, že produkuje uchopitelné trojrozměrné objekty. Jak lze vidět na obrázku 3.1.

Zdrojová data získaná pomocí jakékoli zobrazovací metody, jsou obvykle zobrazena ve dvou dimenzích. S post-processingovými nástroji a algoritmy je možné vytvořit multiplanární reformace a trojrozměrné pohledy na anatomii. Procesní řetězec zahrnující získávání obrazů do výroby trojrozměrného modelu rychlého prototypu se skládá z následujících tří kroků a bude podrobně popsán v následujících částech: "Získání obrazu", "Post-zpracování obrazu" a "3D tisk" [26].



Obr. 3.1 3D model srdce pacienta [27].



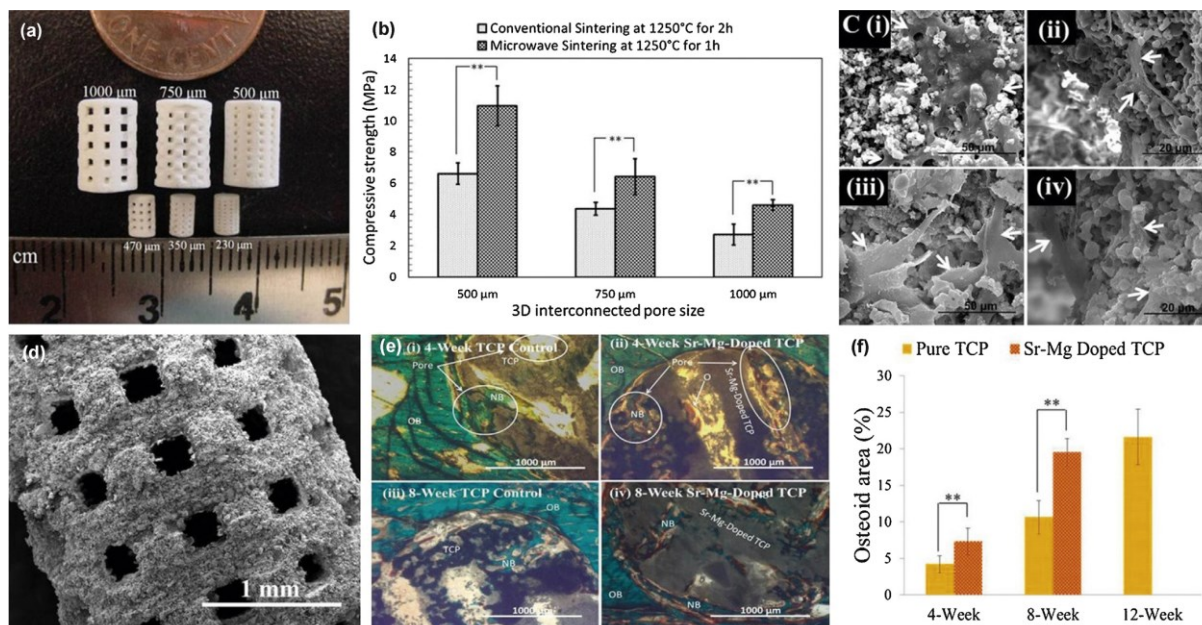
Tabulka 2 shrnuje několik vybraných kombinací materiálů a vazebných systémů pro kostní scaffold (lešení) pomocí 3D. Pojiva na bázi škrobu jsou jedním z kandidátů na aplikace na náhradu kostí. Tato pojidla jsou biokompatibilní a vytvářejí struktury, které mají mechanickou pevnost v blízkosti trabekulární kosti. Konstrukční návrhy a podmínky po zpracování mohou mít vliv na mechanické vlastnosti 3D lepenky na bázi škrobu. 3D polyetylenové (PE) scaffold (lešení) s porézností 22,3-49,7% vykazují pevnost v tahu až 4 MPa a žádnou toxicitu pro lidské osteoblasty. CaP keramika se široce používá v inženýrství kostní tkáně kvůli jejich vynikající bioaktivitě, osteokonduktivitě a podobnostem v kompozici kosti. Kapiláry a tvorba cév a homogenní osteokondukce z centrálních kanálů, byly dříve pozorovány v 3D vtištěných HA blocích. Účinek velikosti pórů na lidské fetální osteoblasty (hFOB) byl studován s 3D tištěnými TCP scaffold (lešení)mi. Snížení navržené velikosti pórů z 1000 na 750 a 500 mikrometrů při zvýšení proliferované buněčné hustoty [28].

Tabulka 3.1: 3D tiskové materiály pro inženýrství kostních tkání [28].

Material	Layer thickness	Binder
TCP	20 $\mu\text{m}$	Aqueous based
$\alpha/\beta$ -TCP modified with 5 wt% hydroxypropylmethylcellulose	100 $\mu\text{m}$	Water
CaP mixture with Ca/P ratio of 1.7	100 $\mu\text{m}$	10% phosphoric acid
Tetracalcium phosphate (TTCP), dicalcium phosphate and TCP	100 $\mu\text{m}$	25% citric acid
HA	300 $\mu\text{m}$	Schelofix (water soluble polymeric compound)
TTCP/ $\beta$ -TCP	100 $\mu\text{m}$	25 wt% of citric acid
TTCP/calcium sulfate dihydrate	100 $\mu\text{m}$	25 wt% of citric acid
HA	100 $\mu\text{m}$	No information
TCP	100 $\mu\text{m}$	No information
Biphasic calcium phosphate (BCP)	100 $\mu\text{m}$	No information
$\alpha/\beta$ -TCP (final product: dicalcium phosphate dihydrate (DCPD))	No information	20% phosphoric acid
Starch/PLLA + PCL	No information	Distilled water + blue dye
High density PE (HDPE)	0.175 mm	Maltodextrin + polyvinyl alcohol (PVA)
$\text{SiO}_2$ -ZnO-doped TCP	20 $\mu\text{m}$	Aqueous based
PE or HDPE	0.175 mm	Water based binder
PLA	No information	Chloroform
TCP (final product:DCPD)	0.1 mm	20% phosphoric acid
HA/maltodextrin	0.175	Water based binder
TTCP (final product: HA)	100 $\mu\text{m}$	0.5 mol/l $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ + 10% $\text{H}_3\text{PO}_4$
TCP (final product: brushite)	100 $\mu\text{m}$	0.5 mol/l $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ + 10% $\text{H}_3\text{PO}_4$
HA/A-W glass	0.1 mm	Water based

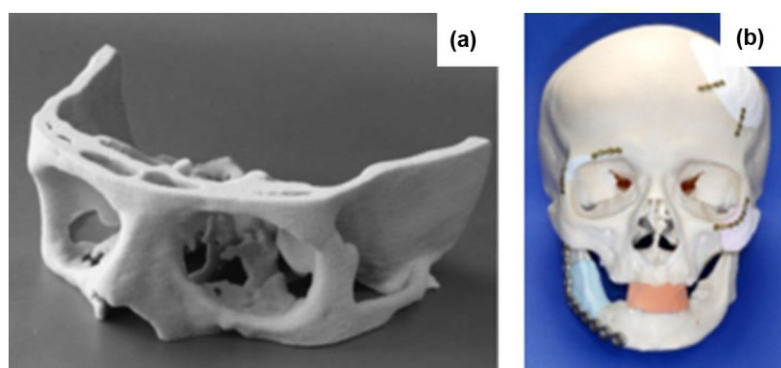
3D leštěné a mikrovlnné slinuté  $\beta$ -TCP (Tricalcium Phosphate) scaffold (lešení) vyrobené pomocí 3D jsou ukázány na obr. 3.2a, ukazující vzájemně propojenou makro-porozitu ve vzorku. obrázek 3.2c (i-iv) znázorňuje morfologie buněk hFOB na povrchu konstrukce a pórových stěnách po 3 dnech kultivace, které vykazují dobrou buněčnou přilnavost a růst buněk do pórů, což naznačuje, že konstrukce nebyly toxické. Snímku povrchové morfologie sekundárního elektronového mikroskopu (SEM) a navržená distribuce makro pórů v čistém

TCP scaffold (lešení) je znázorněna na obr. 3.2d. Nová kostní formace byla pozorována na rozhraní kostního implantátu / hostitele, jakož i uvnitř vzájemně propojených makro a vnitřních mikro-pórů po 4 a 8 týdnech v čistém i dopovaného TCP, jak je znázorněno na obr. 3.2e. Nicméně, více osteoidní tvorba nové kosti byla pozorována u dopovaného TCP lepidla dopovaného SrO-MgO, jak je znázorněno na obr. 3.2f. Histologická analýza a histomorfometrická analýza odhalují, že léčebná skupina (dopované TCP konstrukci) urychlila v počátečním stadiu rozbité kosti, a později úplně mineralizovanou kost, která by mohla být nezbytná pro rychlé hojení kostí a mineralizaci in vivo. Další studie ukázaly, že přidavek oxidu křemičitého SiO<sub>2</sub>-ZnO do lepidla TCP zvyšuje životaschopnost buněk v různých rozměrech velikosti pórů. Biokompatibilita 3D potažené keramiky CaP byla také studována pomocí osteoklastů [29]. Zbarvení s tartrátovou kyselinou fosfatázou (TRAP), tvorba mezer a mikroskopické obrazy, potvrdili diferenciaci monocytů na mnoho-jádrové buňky podobné osteoklastům na širokém spektru kompozic. Bylo prokázáno, že použití kyseliny fosforečné místo polymerních pojiv může zlepšit jak rozlišení, tak i pevnost v tlaku. HA konstrukce s vysokými povrchovými plochami nevykazovaly cytotoxicitu a adekvátní buněčnou adhezi s buňkami fibroblastů MC3T3-E1. Navíc k in vitro experimentům in vivo biokompatibilita a osteokonduktivita 3D vytištěných konstrukcí ukázala, že 3D impregnované cementy brushitu a monetitu s řízenou otevřenou pórovitostí, zvýšily osteokondukci in vivo u koziho modelu. 3D vytištěné TCP vzorky s mikro a makro-porézností také usnadnily osteogenezi u modelu femuru krysa. Výsledky cytotoxicity buněk MC3T3-E1 na dvou různých kompozicích založených na kostním cementu TTCP / b-TCP a TTCP / dihydrát síranu vápenatého, byly popsány pro inženýrství kostních tkání. Byla použita široká škála pojiva. Bylo zjištěno, že nejkratší doba tuhnutí může být dosažena mezi 20 až 40% kyseliny citronové a 30 až 40% kyseliny mléčné. Nicméně, pro zvýšení doby vytvrzování cementů lze použít nižší rozsah těchto pojiv a různou koncentraci hydrogenfosforečnanu sodného s kyselinou sírovou a fosforečnou [30]. Obrázky 3.3 ukazují specifické implantáty CaP vyrobené 3D tiskem pro pacienta. Tyto výsledky poukazují na aplikaci 3D tisku s velkým uplatněním v medicinském odvětví [28].



Obrázek 3.2. fotografie sintrovaných 3D tištěných TCP scaffold (lešení) pro mechanickou pevnost a testování in vivo (malé vzorky). Porovnání pevnosti v tlaku kompozice sintrované při 1250 °C v konvenčních a mikrovlnných pecích; (c) SEM mikrofotografie buněk hFOB, které ukazují buněčnou adhezi a proliferaci na povrchu scaffold (lešení) a uvnitř 3D propojených makro pórů po 3 dnech kultivace [30].

V přítomnosti byla pozorována úplně mineralizovaná tvorba kosti SrO a MgO v TCP po 12 týdnech, a proto nebyla pozorována žádná oblast osteoidů. Veškeré osteoidní kosti se po 12 týdnech transformovaly do kosti dopované TCP kvůli přítomnosti stroncia a hořčíku. Proto nebyla po 12 týdnech v TCP dopovaných Sr-Mg osteoidní kost.



Obrázek 3.3. (a) 3D tištěný lebeční segment, (b) celkový pohled na lebku nesoucí implantáty. Implantáty jsou fixovány pomocí mini-platové osteosyntézy resp. biocortické osteosyntézy [29].

## 4. Experimentální část

Úkolem praktické části je otestovat vzorky z oceli AISI 316L vyrobeny pomocí 3D tisku a provést na nich základní mechanické a korozní zkoušky. Cílem je vyhodnotit data získaná z těchto zkoušek, která byla porovnána s hodnotami, získanými ze vzorků vytvořených standardní metodou. V závislosti na výsledných hodnotách je možné posoudit progresivitu 3D tisku.

### 4.1. AISI 316L vytvořená pomocí 3D tisku

Pomocí 3D tisku bylo vyrobeno několik vzorků z oceli AISI 316L, které byly následně podrobeny mechanickým (zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu) a korozním zkouškám. Dále bylo provedeno pozorování struktury materiálu pomocí metalografie a pozorování lomových ploch pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu. Vzorky byly vytvořeny za účelem zjistit tyto vlastnosti a porovnat je se vzorky připravenými konzervativním způsobem.

Vzorky jsou označeny 200W, 200W TZ, 400W a 400W TZ. Číslo označuje výkon laseru při tavení materiálu a TZ značí, že vzorek byl tepelně zpracován před zkouškami.

### 4.2. Materiál

Vstupním materiálem je prášek z oceli AISI 316L, který byl připraven pomocí práškové metalurgie. Konkrétně atomizací, kdy v důsledku působení plynu, byla tavenina rozstříkována do malých kapiček. Ty velkou rychlostí utuhly do jemných kulovitých tvarů. Průměr práškových částic dosahoval  $45 \pm 15 \mu\text{m}$ . Chemické složení materiálu lze vidět v tabulce 4.1

Tabulka 4.1 Chemické složení prášku:

Hm%	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	O	P	C	S
316L	16-18	10-14	2-3	2 max	1 max	0,1 max	0,1 max	0,045 max	0,03 max	0,03 max

### 4.3. Parametry výroby

Pro 3D tisk byl použit stroj Renishaw AM400, který dokáže vytvořit maximální velikost součásti (X, Y, Z) 248x248x285 mm. Rychlost tavení materiálu je  $5\text{-}20 \text{ cm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ . Geometrická přesnost je  $\pm 50 \mu\text{m}$  a rychlost skenování  $2000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Rychlost polohování laseru je  $7000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Tloušťka vrstvy je od 20 do 100  $\mu\text{m}$ . Průměr laserového paprsku dosahuje 70  $\mu\text{m}$  a výkon laseru je maximálně 400W. Kvůli bezpečnosti tavení probíhá tisk za neustálého proudění inertního plynu: Argon. Stroj dokáže tisknout materiál na bázi nerezových ocelí 316L a 174PH.

Dále dokáže tisknout nástrojovou ocel H13, dále hliníkovou slitinu AlSi10Mg a titanové slitiny Ti6Al4V a Ti6Al7Nb, kobalt-chrom CoCr a niklové slitiny Inconel 625 a Inconel 718.

#### 4.4. Vytvoření vzorků

Byly vytvořeny vzorky při působení laseru s výkonem 200W a s výkonem 400W. Dále byla část vzorku (200W a 400W) zpracována tepelně. Proces tepelného zpracování probíhal ve vakuové peci, kdy ohřev trval tři hodiny, výdrž a ustálení na teplotě 550 °C další tři hodiny a závěrečné ochlazování proběhlo volně v peci po dobu dvanácti hodin bez přístupu vzduchu. Konečná hodnota se pohybovala kolem hodnoty 90 °C

#### 4.5. Hodnoty velikosti vzorků

Pro zkoušku tahem bylo testováno celkem 24 těles, z toho 9 byl vytvořeno 3D tiskem a 15 konzervativní metodou. Obecné velikosti těles jsou uvedeny v tabulce 4.2. Všechna tělesa byla změřena pro vstupní hodnoty pro tahovou zkoušku. Hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 4.3 a 4.4.

Tabulka 4.2 Tělesa pro tahovou zkoušku obecná data

Vzorek	a (mm)	b (mm)	b/a (mm)	L (mm)
A 3D	3	9,5	3,16	140
A normál	3	9,5	3,16	140
B 3D	2	6,5	3,25	80
B normál	2	6,5	3,25	80
C 3D	1,5	5	3,33	80
C normál	1,5	5	3,33	80

Tabulka 4.3 Tělesa pro zkoušku tahem vytvořená 3D tiskem.

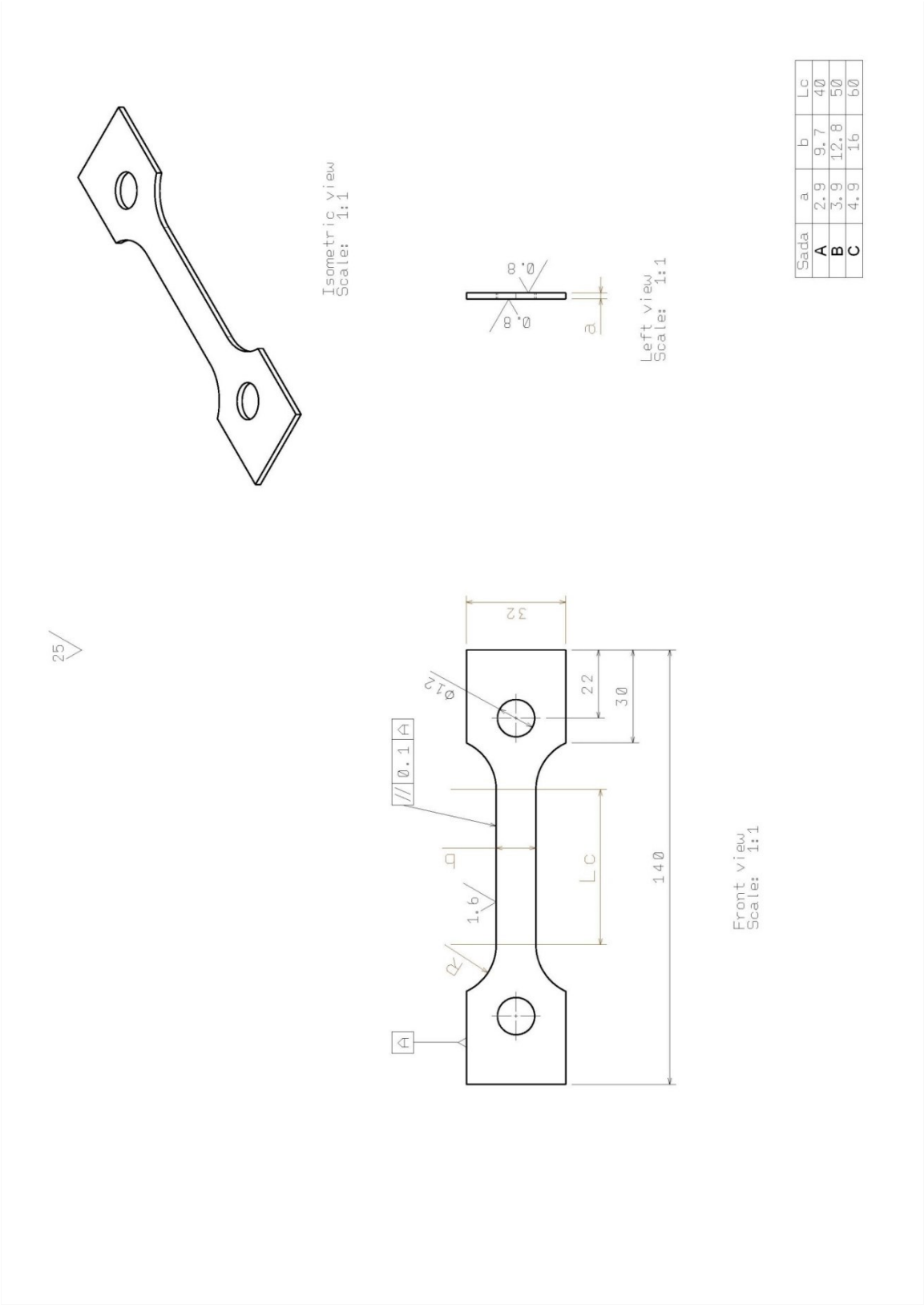
Vzorek	a (mm)	b (mm)	L0 (mm)
A1	3,07	9,75	50,89
A2	3,05	9,75	50,88
A3	3,05	9,77	50,80
B1	2,11	6,52	31,98
B2	2,12	6,55	32,50
B3	2,12	6,54	32,90
C1	1,62	4,87	29,70
C2	1,66	4,88	31,13
C3	1,65	4,89	30,21

Tabulka 4.4 Tělesa pro zkoušku tahem vytvořená konzervativní metodou.

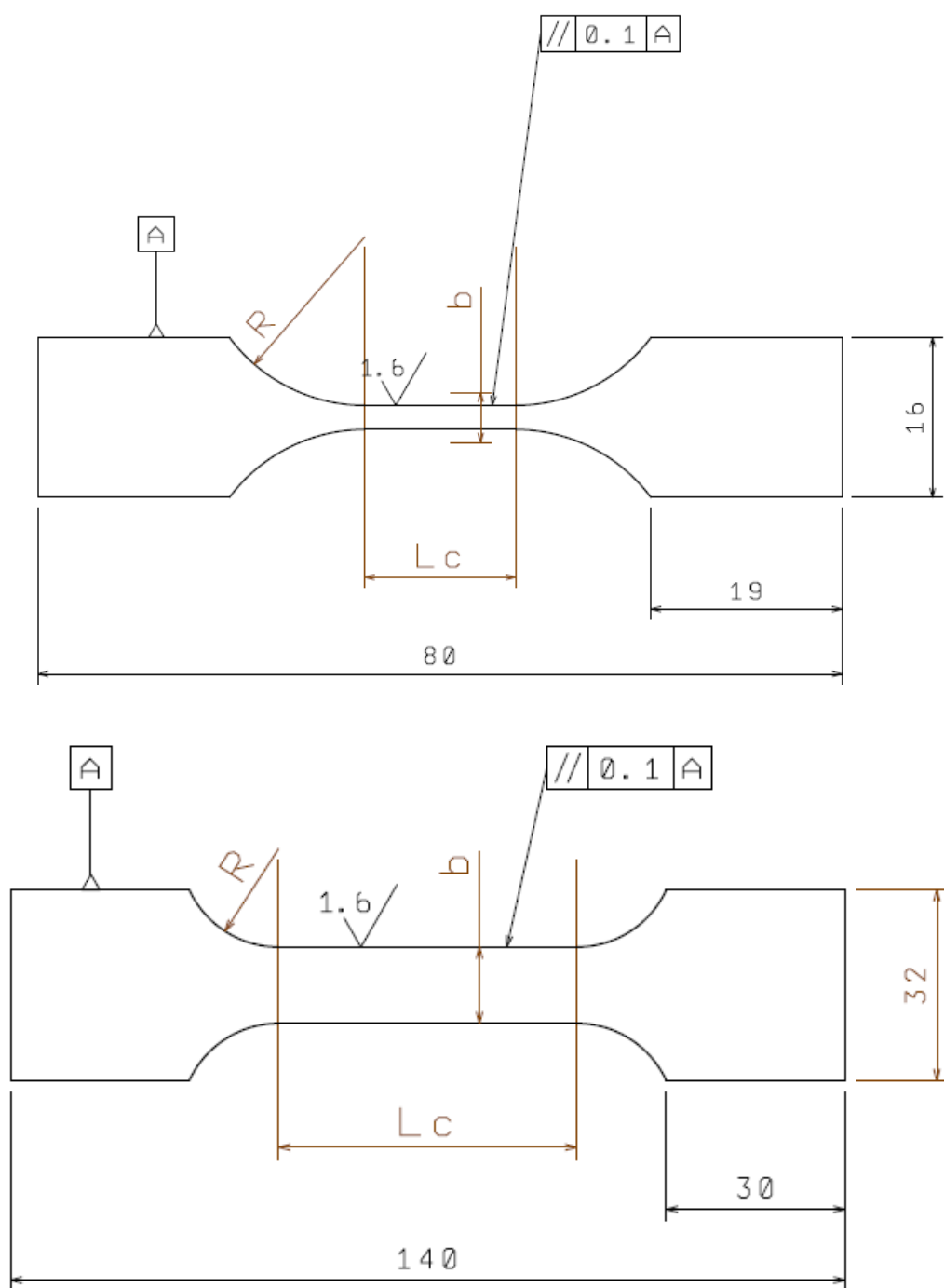
Vzorek	a (mm)	b (mm)	L1 (mm)
A1	3,02	9,71	47,88
A2	3,02	9,67	47,88
A3	3	9,67	47,88
A4	3	9,71	47,88
A5	3,01	9,68	47,88
B1	1,94	6,49	31,268
B2	1,96	6,66	31,133
B3	1,93	6,55	31,136
B4	1,97	6,55	31,363
C1	1,49	4,84	25,571
C2	1,5	4,84	25,462
C3	1,49	4,85	24,853
C4	1,49	4,87	26,499
C5	1,49	4,83	26,325

#### 4.6. Technická dokumentace

Grafický náhled a údaje o vyrobených tělesech pro zkoušku tahem (obr. 4.1 a 4.2)



Obrázek 4.1 – Technický náčrtek vzorků vytvořených klasickým způsobem



Obrázek 4.2 – Technický náčrtek vzorků vytvořených pomocí 3D tisku.

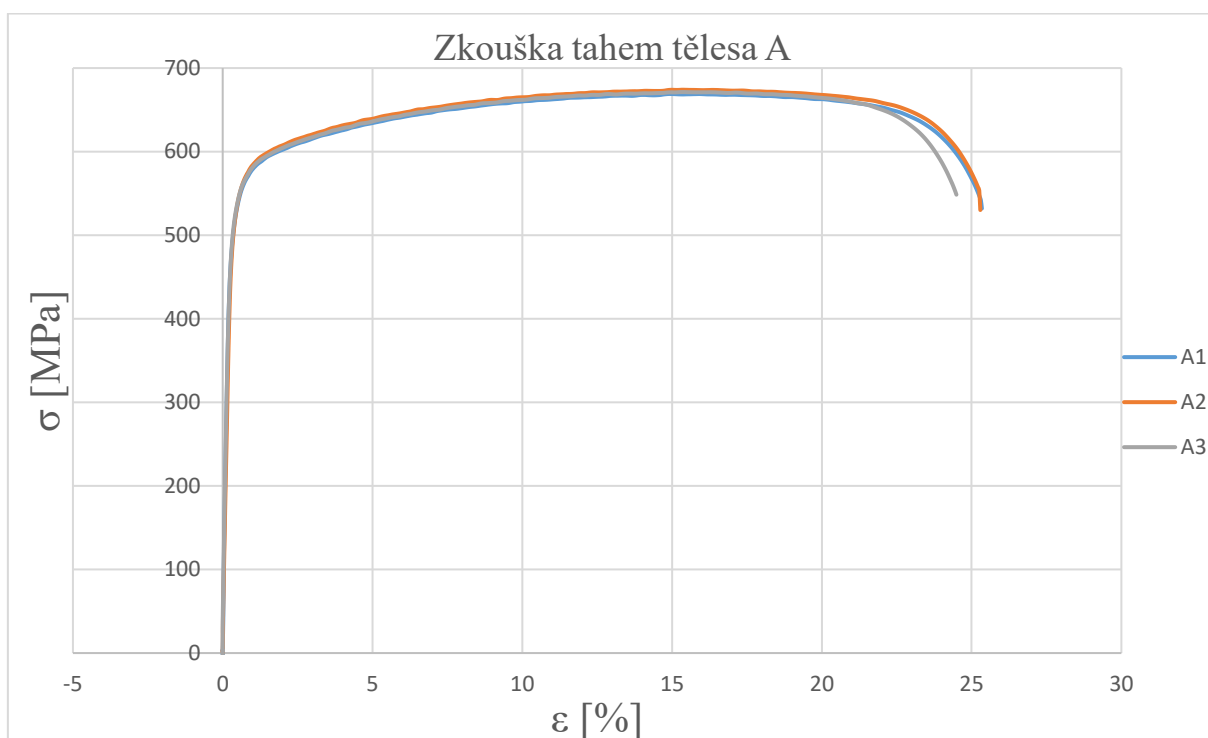


#### 4.7. Zkouška tahem

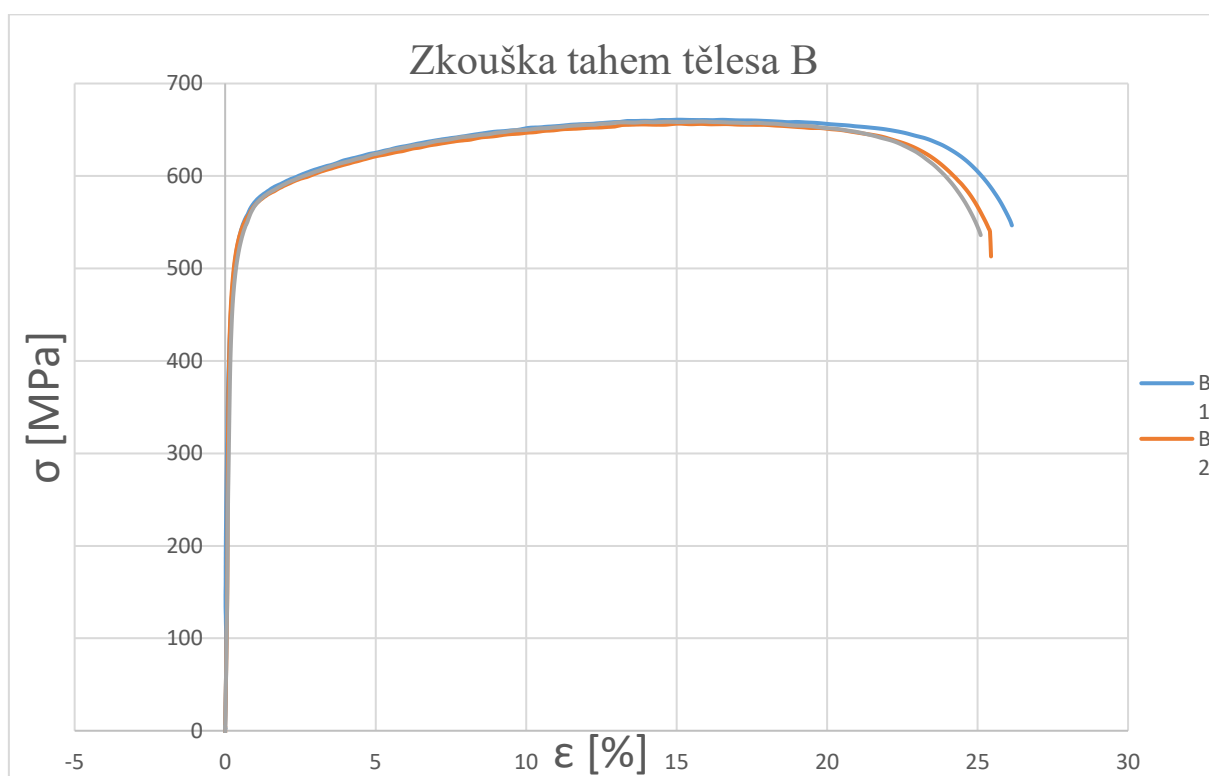
Zkoušky byly provedeny na stroji. Zwick/Roell Z150 a softwarem textXpert II byly vyhodnoceny výsledky vzorků.

Zkoušce bylo podrobena celkem 9 vzorků vytvořených pomocí 3D tisku. Byly to 3 série po 3 kusech. U poslední série (těleso typu C) byl neúspěšně přetržen jeden vzorek.

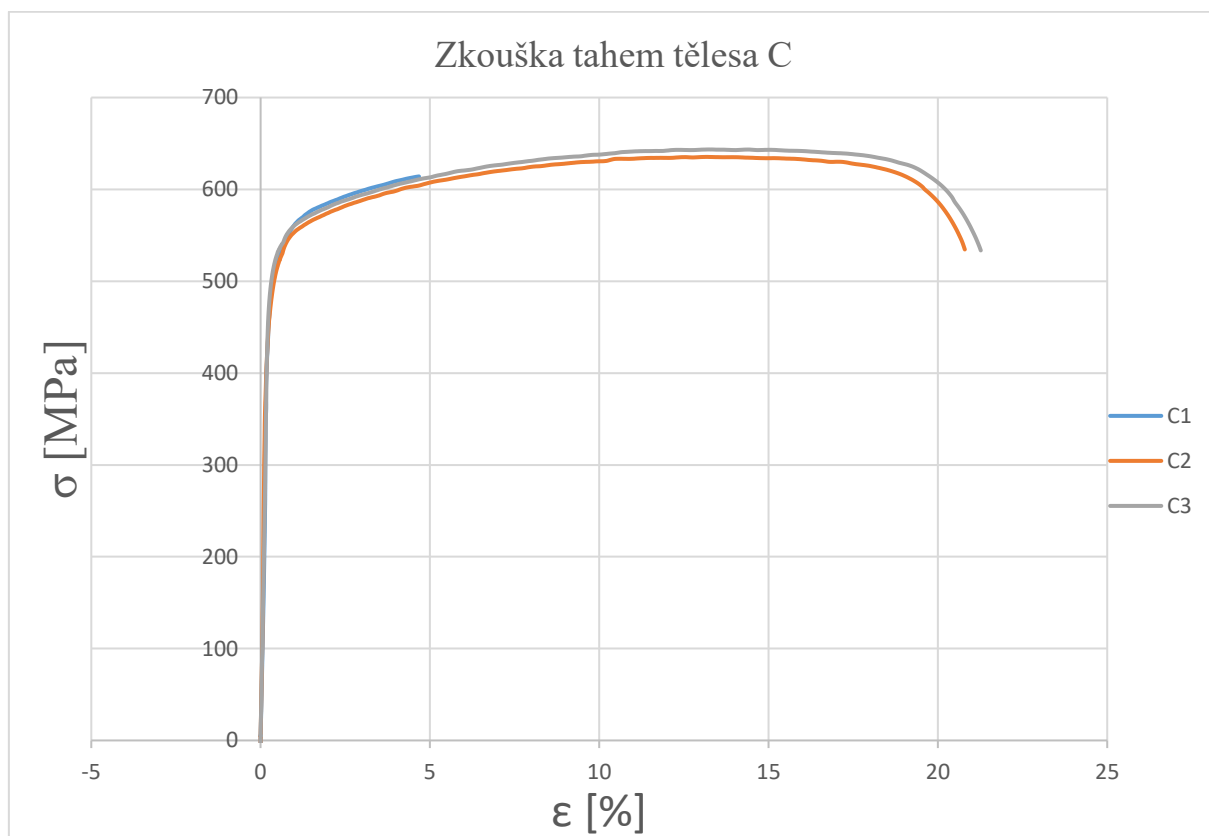
Obrázek 4.3 – Tahová zkouška tělesa A vyrobeného 3D tiskem



Obrázek 4.4 – Tahová zkouška tělesa B vyrobeného 3D tiskem



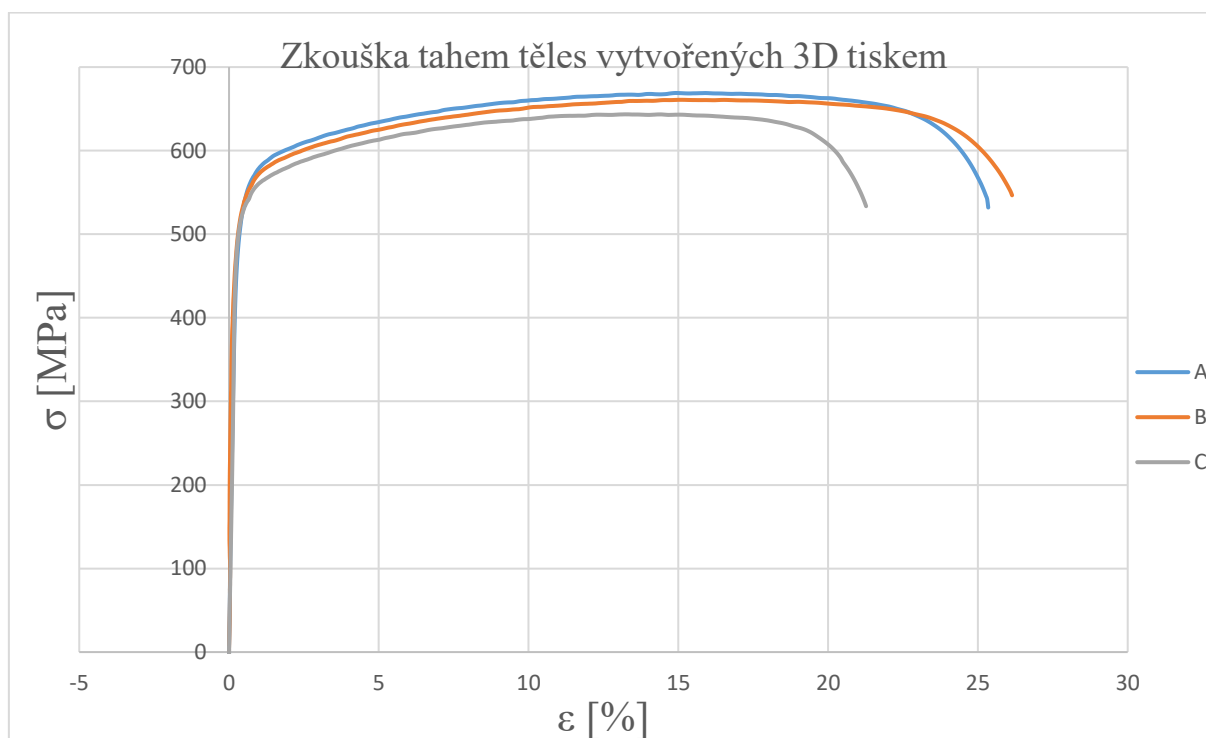
Obrázek 4.5 – Tahová zkouška tělesa C vyrobeného 3D tiskem



Tabulka 4.5 – Data naměřených hodnot z tahové zkoušky 3D vzorků.

	<b>E</b> GPa	<b>R<sub>p0.2</sub></b> MPa	<b>R<sub>m</sub></b> MPa	<b>F<sub>lm</sub></b> kN	<b>L<sub>0</sub></b> mm	<b>L<sub>u</sub></b> mm	<b>A<sub>m</sub></b> %	<b>A<sub>t</sub></b> %	<b>a<sub>0</sub></b> mm	<b>b<sub>0</sub></b> mm	<b>S<sub>0</sub></b> mm <sup>2</sup>	<b>a<sub>l</sub></b> mm	<b>b<sub>l</sub></b> mm	<b>Z</b> %
<b>A1</b>	204	524	;	20,02	50,89	63,75	25,3	25,8	3,07	9,75	29,93	1,86	7,36	54
<b>A2</b>	207	526	674	20,04	50,88	63,73	25,3	25,7	3,05	9,75	29,74	1,96	7,32	52
<b>A3</b>	209	526	671	20	50,8	63,26	24,5	24,9	3,05	9,77	29,8	1,77	7,35	56
<b>B1</b>	208	526	661	9,09	31,98	40,92	28	27,9	2,11	6,52	13,76	1,37	4,92	51
<b>B2</b>	207	530	657	9,12	32,5	41,03	26,2	26,7	2,12	6,55	13,89	1,43	4,96	49
<b>B3</b>	209	511	659	9,14	32,9	41,65	26,6	27,5	2,12	6,54	13,86	1,42	4,85	50
<b>C1</b>	209	522	616	4,86	29,7	29,7	-	1,8	1,62	4,87	7,89	1,62	4,87	-
<b>C2</b>	208	491	635	5,15	31,13	38,47	23,6	25,9	1,66	4,88	8,1	1,1	3,74	49
<b>C2</b>	206	514	643	5,16	30,21	37,17	23	25,7	1,65	4,86	8,02	1,11	3,68	49

Obrázek 4.6 – Tahová zkouška těles vytvořených 3D tiskem



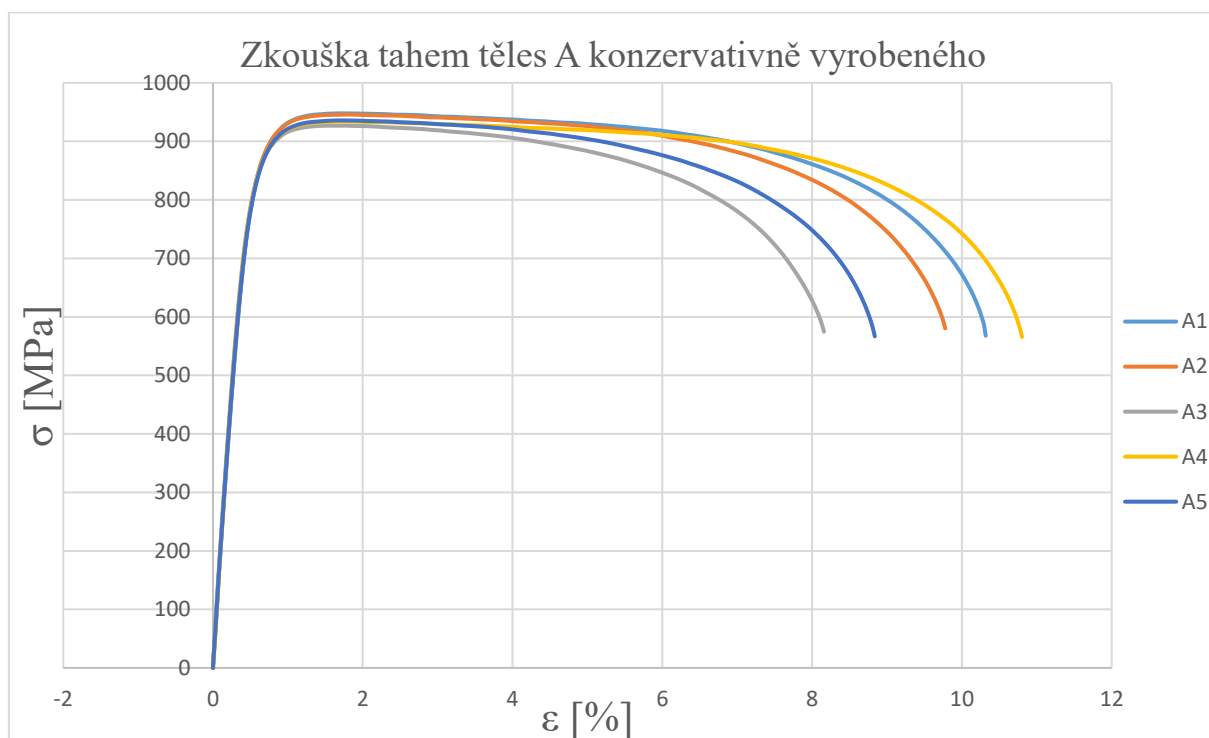
Vzorky typu C byly vytvořeny s nejmenší možnou tloušťkou, která lze vytisknout 3D tiskem. Vzorky vykazují zvýšenou tažnost a homogenitu materiálu. Různé průřezy těles výrazně neovlivnily výsledky ze zkoušky.

Tabulka 4.6- Data naměřených hodnot z tahové zkoušky klasických vzorku oceli 316L

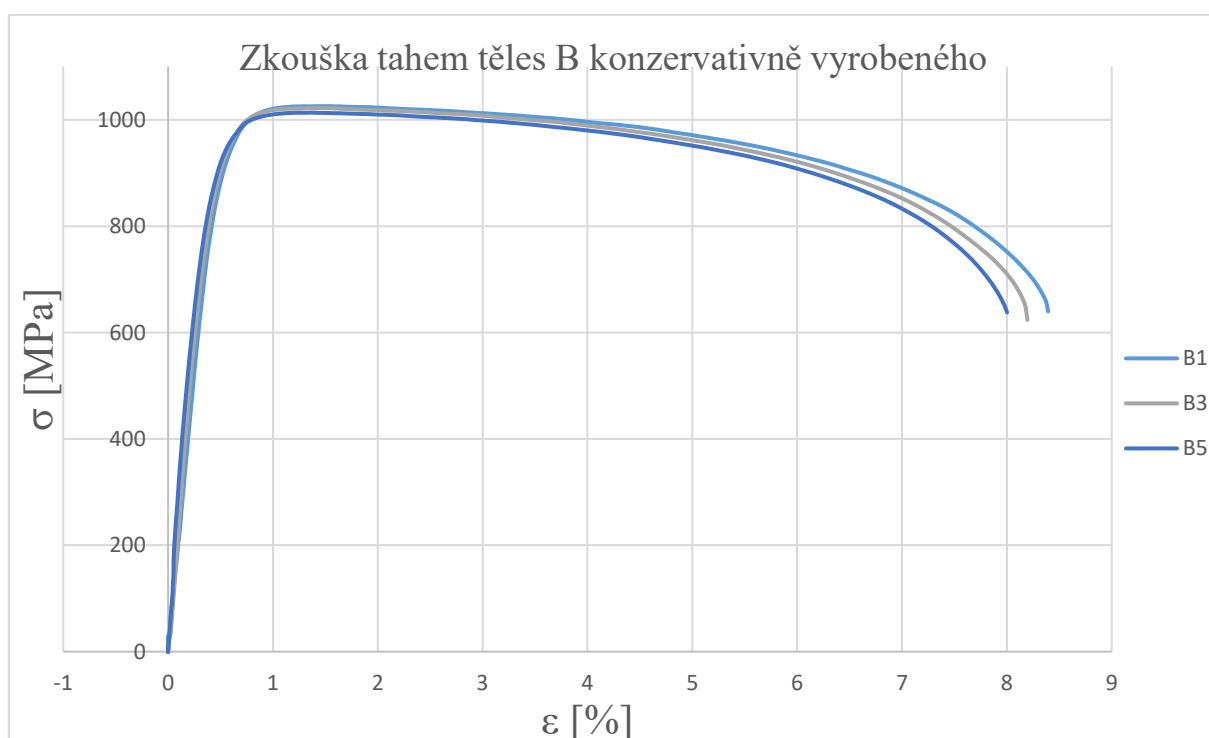
	<b>E</b> GPa	<b>R<sub>p0.2</sub></b> MPa	<b>R<sub>m</sub></b> MPa	<b>F<sub>lm</sub></b> kN	<b>L<sub>0</sub></b> mm	<b>L<sub>u</sub></b> mm	<b>A<sub>m</sub></b> %	<b>A<sub>t</sub></b> %	<b>a<sub>0</sub></b> mm	<b>b<sub>0</sub></b> mm	<b>S<sub>0</sub></b> mm <sup>2</sup>	<b>a<sub>1</sub></b> mm	<b>b<sub>1</sub></b> mm	<b>Z</b> %
<b>A1</b>	204	769	948	27,8	47,88	53,13	11	12,3	3,02	9,71	29,32	2,23	7,64	42
<b>A2</b>	207	770	946	27,62	47,88	52,78	10,2	11,7	3,02	9,67	29,2	1,9	7,27	53
<b>A3</b>	209	770	927	26,89	47,88	52,47	9,6	9,8	3	9,67	29,01	1,86	7,72	51
<b>A4</b>	205	778	934	27,21	47,88	53,32	11,4	12,9	3	9,71	29,13	2,09	7,48	46
<b>A5</b>	208	764	936	27,27	47,88	52,47	9,6	10,6	3,01	9,68	29,14	2,02	7,49	48
<b>B1</b>	207	714	1026	12,91	31,27	34,65	10,8	13,1	1,94	6,49	12,59	1,35	4,94	47
<b>B2</b>	207	808	1022	12,92	31,14	34,14	9,7	12,7	1,93	6,55	12,64	1,47	5,11	41
<b>B3</b>	206	837	1013	12,71	31,21	33,88	8,6	12,5	1,92	6,53	12,54	1,36	5,17	44
<b>B4</b>	208	775	1019	13,13	31,38	34,57	10,2	13,9	1,96	6,57	12,88	1,32	5,2	47
<b>B5</b>	205	782	1016	13,08	31,4	34,84	11	13,8	1,99	6,47	12,88	1,2	4,85	55
<b>C1</b>	208	739	912	6,58	251,57	29,18	14,1	16,1	1,49	4,84	7,21	0,93	3,55	54
<b>C2</b>	209	761	900	6,53	25,46	29,31	15,1	17	1,5	4,84	7,26	0,95	3,68	52
<b>C3</b>	205	680	898	6,49	24,85	28,62	15,1	17,7	1,49	4,85	7,23	1,08	3,62	46
<b>C4</b>	206	706	910	6,6	26,5	30,25	14,2	15,1	1,49	4,87	7,26	0,97	3,65	51
<b>C5</b>	210	719	913	6,57	26,33	30,06	14,2	16,5	1,49	4,83	7,2	1,03	3,6	48

Vzorky se stejným označením (A, B,, C) mají stejnou velikost průřezu i délky.

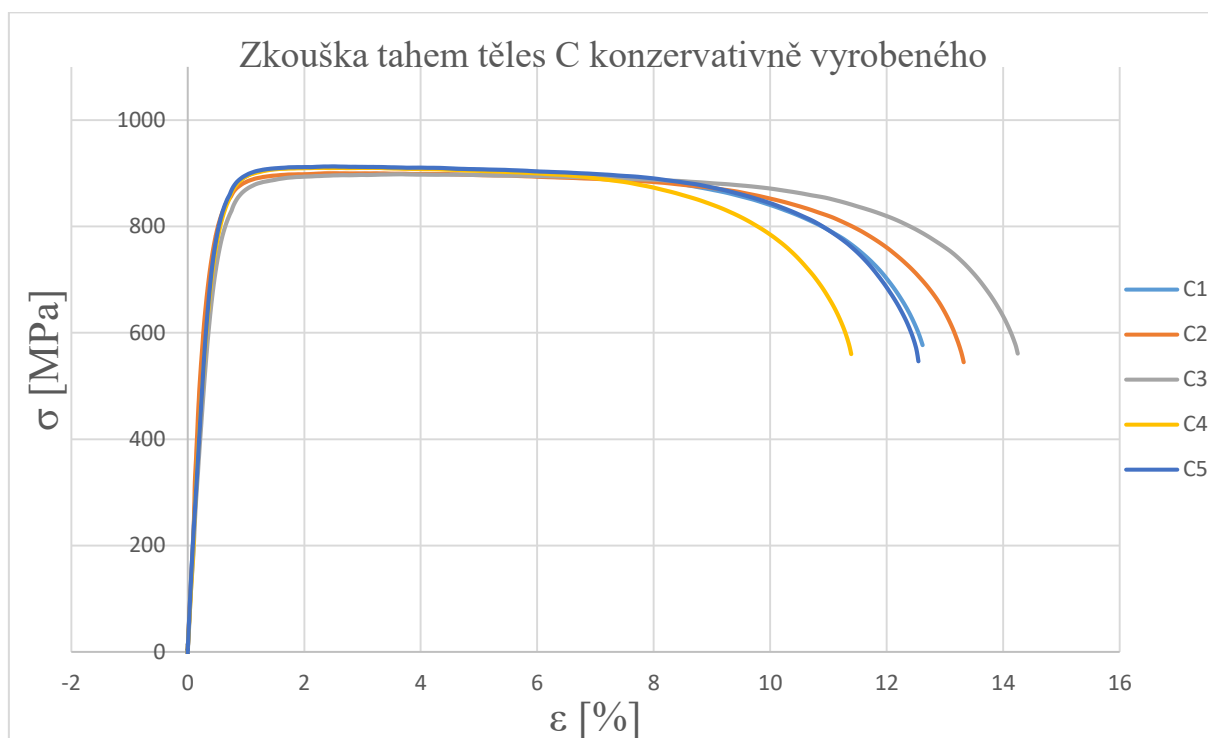
Obrázek 4.7 Tahová zkouška tělesa A vyrobeného konzervativní metodou



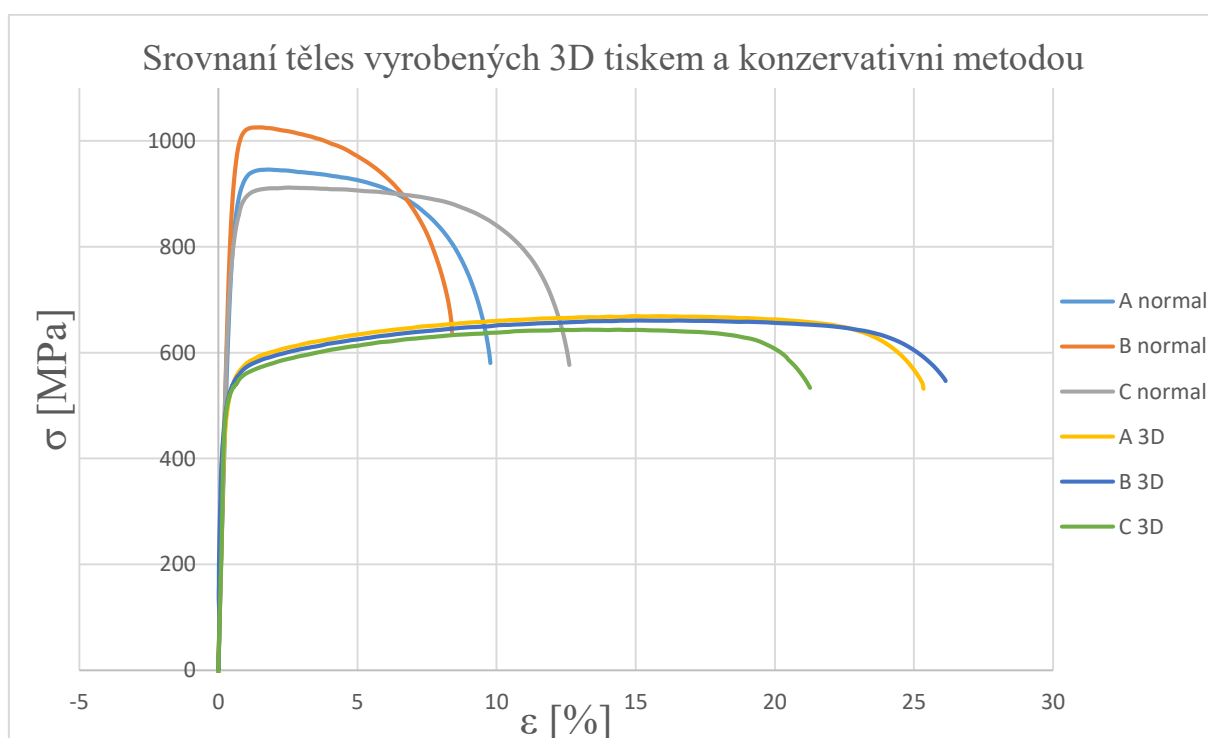
Obrázek 4.8 Tahová zkouška tělesa B vyrobeného konzervativní metodou



Obrázek 4.9 Tahová zkouška tělesa C vyrobeného konzervativní metodou



Obrázek 4.10 Srovnání tahových zkoušek těles vytvořených 3D tiskem a standardní metodou.



Tabulka 4.7 – Statistické vyhodnocení.

	<b>E</b> [GPa]	<b>R<sub>p0.2</sub></b> [MPa]	<b>R<sub>m</sub></b> [MPa]	<b>A<sub>m</sub></b> [%]	<b>A<sub>t</sub></b> [%]	<b>Z</b> [%]
<b>3D A</b>	207	525	671	25,03	25,47	54
<b>A normál</b>	207	770	938,2	10,36	11,46	48
<b>3D B</b>	208	522	659	26,93	27,37	50
<b>B normál</b>	207	783	1019	10,06	13,2	47
<b>3D C</b>	208	509	631	23,30	25,80	49
<b>C normál</b>	208	721	907	14,54	16,48	50

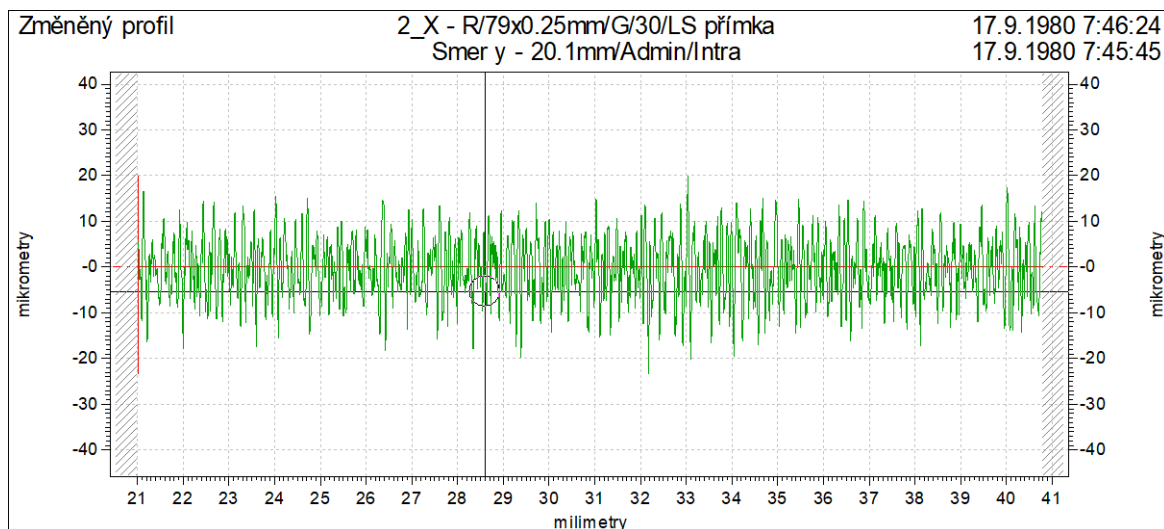
Grafické vyhodnocení vzorků zkoušek tahem, vyrobených 3D tiskem na obrázcích 4.3 až 4.5. Obrázek 4.6 ukazuje srovnání různých průřezů vzorku vytvořených pomocí 3D tisku. Na obrázku lze vidět velkou tažnost materiálu ale nejmenší vzorek typ C, který má výrazně menší tažnost než zbývající vzorky. Je to dáno velikostí vzorku, kdy byl vytvořen vzorek s nejmenší možnou tloušťkou, kterou umožňuje 3D tiskárna. Obrázky 4.7 až 4.9 vykazují chování vzorků vytvořených standardní konzervativní metodou. Naměřené hodnoty vzorků jsou udány v tabulkách 4.5 a 4.6.

Ze statistických výsledků tabulka 4.7 lze usoudit, že materiál vykazuje skoro identický modul pružnosti a také kontrakce. Ale daleko rozdílnější je tažnost materiálu, kde 3D vzorky vykazují hodnoty dvojnásobně vysoké proti klasicky připravovaným vzorkům oceli. Na obrázku 4.10 lze vidět srovnání vzorků vytvořených konzervativní metodou a vzorků vytvořených 3D tiskem. Na první pohled lze vidět, že vzorky připravené 3D tiskem mají homogenitu a velice podobné mechanické vlastnosti, proti vzorkům vytvořeným standardní metodou. Vzorky vytvořené standardní metodou vykazují mez pevnosti kolem 900 až přes 1000 MPa. Zatímco vzorky připravené 3D tiskem mají mez pevnosti zhruba o 30% nižší.

#### 4.8. Drsnost povrchu

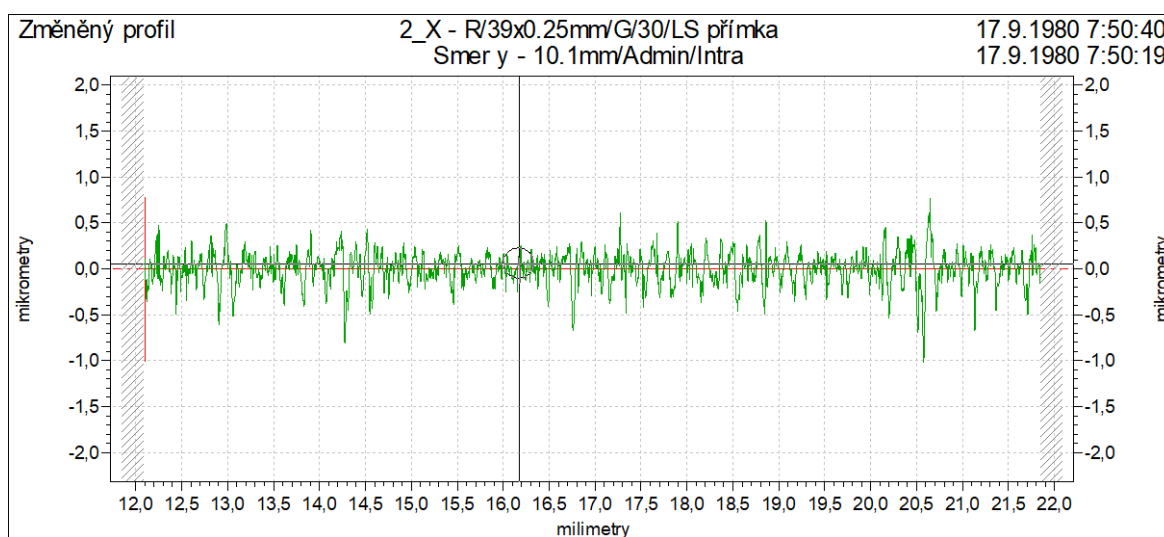
Vzorky, které byly vyrobeny pomocí 3D tisku nebyly povrchově upravené a měli drsnější povrch než vzorky připravované klasickou metodou. Proto bylo provedeno měření drsnosti povrchu. Měření drsnosti proběhlo ve školních laboratořích na přístroji: Form Talysurf 50 Taylor/Hobson.

Obrázek 4.11 Drsnost povrchu vzorku připraveného 3D tiskem



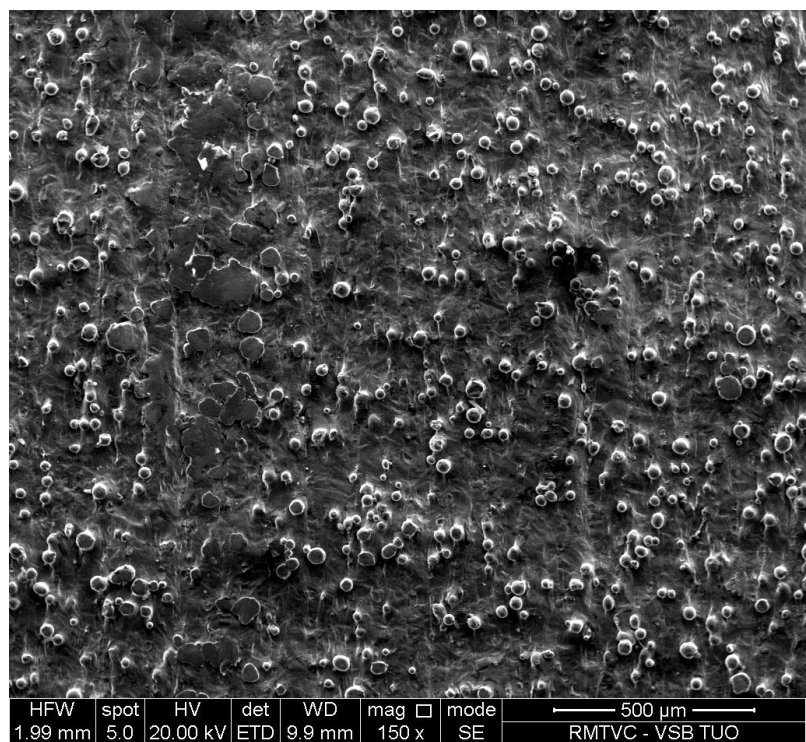
Drsnost povrchu vzorku vyrobeného pomocí 3D tisku, měla hodnotu  $R_a 5,3\mu\text{m}$  v podélném směru a  $R_a 5,4\mu\text{m}$  v příčném směru. Průběh drsnosti je zachycený na obrázku 4.11. Vysoká drsnost je způsobená natavenými prachovými částicemi které lze vidět na obrázku 4.13 a 4.14.

Obrázek 4.12 Drsnost povrchu vzorku připraveného konzervativním způsobem.

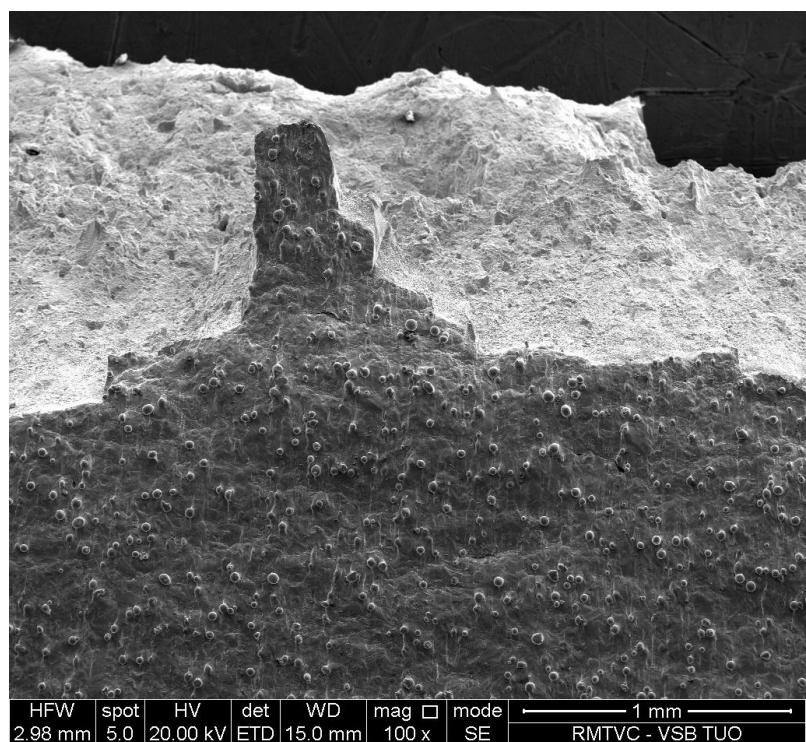


Drsnost povrchu vzorku vyrobeného klasickou metodou, měla hodnotu  $R_a 0,1\mu\text{m}$  v podélném směru a  $R_a 0,13\mu\text{m}$  v příčném směru. Průběh drsnosti je zachycený na obrázku 4.12.





Obrázek 4.13 – Vzorok připravený 3D tiskem. Na obrázku lze vidět natavené částice prášku.



Obrázek 4.14 – Vzorok připravený 3D tiskem. Na obrázku lze vidět lomové porušení vzorku pro tahovou zkoušku. Na povrchu vzorku lze pozorovat natavené kuličky prášku.

#### 4.9. Zkouška tvrdosti

Na vzorcích vytištěných pomocí 3D tiskárny byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse. Zkoušky byly provedeny podle normy ČSN EN ISO 6507-1. Bylo hodnoceno celkem 5 vzorků, kdy 4 vzorky byly vytvořené 3D tiskem a pátý vzorek sloužil jako referenční k porovnání údajů mezi vzorky 3D a vzorkem připraveným klasickou metodou (válcováním a následným obrobením). Pro měření bylo použito zatížení s označením HV30, působící síla indentoru na zkoušené těleso byla 294,3N.

Tabulka 4.7 Naměřené hodnoty tvrdosti

HV30	HV	HV	HV	HV
	1	2	3	průměr
normální	305	310	308	307,7
3D 200W	205	225	220	216,7
3D 200W TZ	205	214	212	210,3
3D 400W	205	208	210	207,7
3D 400W TZ	205	212	205	207,3
3D 400W tah. Zk.	205	210	208	207,7
3D 200W	-	-	-	204
3D 200W TZ	-	-	-	208
3D 400W	-	-	-	213
3D 400W TZ	-	-	-	200

Z tabulek 4.7 lze vidět, že vzorky vytvořené pomocí 3D tisku mely srovnatelnou tvrdost ať už byly tepelně zpracovány nebo ne. Ovšem proti vzorku připraveným konzervativním způsobem, byla tvrdost o 30% nižší.

#### 4.10. Zkouška rázem v ohybu

U materiálu byla provedena zkouška rázem v ohybu, která byla porovnána mezi vzorky vyrobenými 3D tiskem za různých podmínek a poté porovnána s vzorky vytvořenými konzervativní metodou. Z tabulky 4.8 jde vidět, že tepelné zpracování ovlivnilo vzorek 200W, který obsahoval velké množství dutin. Jejich počet byl zredukován na menší množství. Stejný jev se ale nepotvrdil při vzorcích 400W, kde jsou dutiny velice malé a je jich minimální množství. Pro ověření tvrzení by bylo zapotřebí většího množství vzorků, jejichž příprava je velice drahá.

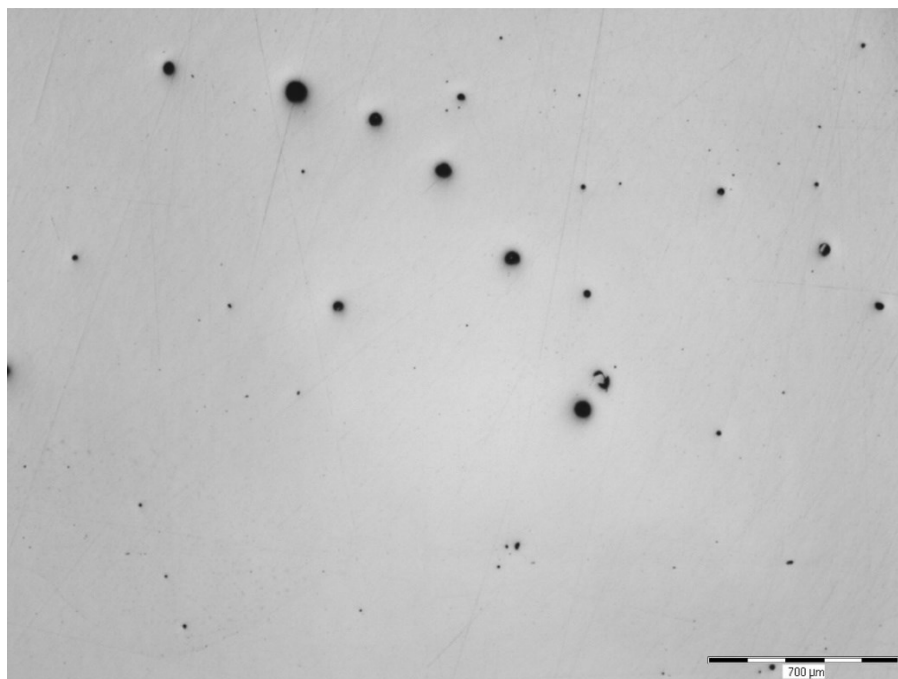
Tabulka 4.8 Zkouška rázem v ohybu

Vzorek	200W	200W TZ	400W	400W TZ	316L normál
	J	J	J	J	J
C	113	137	154	151	120

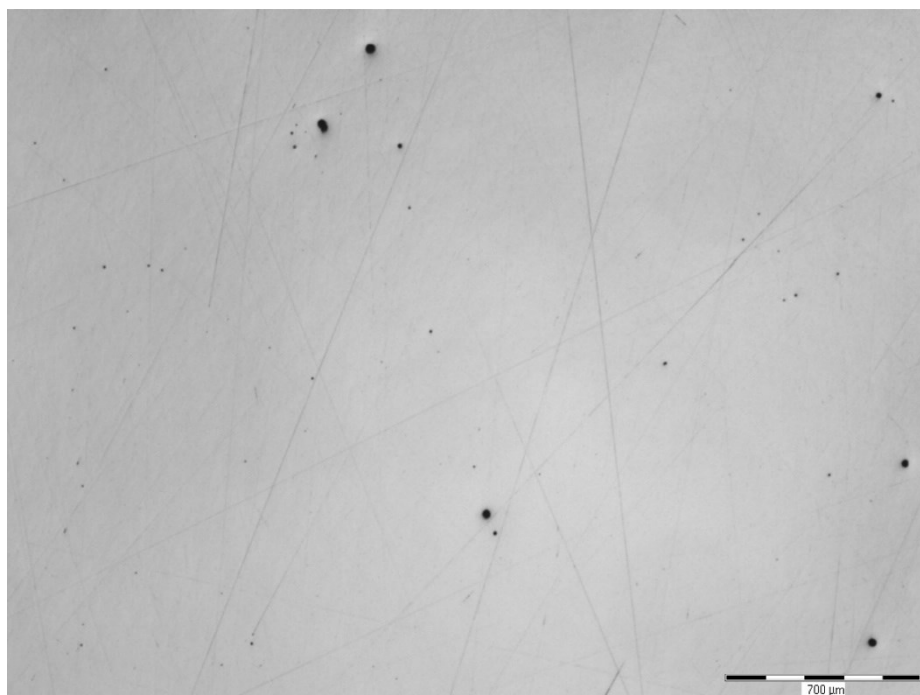
### 5. Metalografické pozorování

Byl proveden metalografický výbrus na vzorcích. Pro přípravu vzorku byl použit standardní postup broušení (brusné papíry 200, 400, 800, 1200). Poté pro vyleštění povrchu byl použit diamantový prach s velikostí částic 0,9 $\mu$ m, 0,6 $\mu$ m, 0,3 $\mu$ m a 0,1 $\mu$ m. Vzorky byly poté hodnocené v nenaleptaném stavu, kdy se hodnotila pórovitost povrchu. Poté byly vzorky naleptány v roztoku „V2“ (10HCl : 1HNO<sub>3</sub> : 10H<sub>2</sub>O). Vzorky byly hodnoceny na mikroskopickém přístroji Olympus IX70.

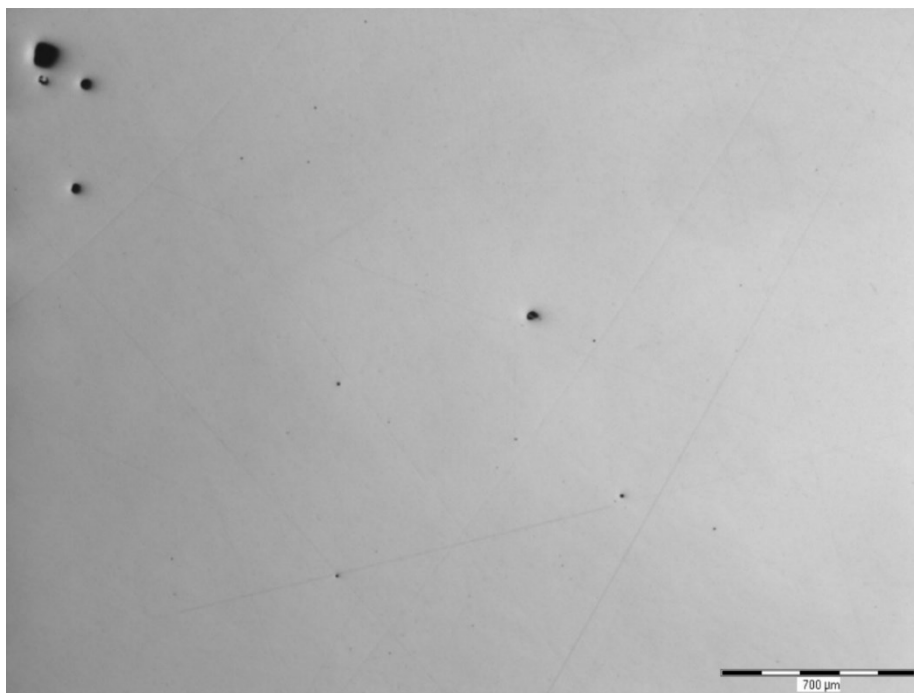
Na obrázcích 5.1 až 5.4 lze vidět vzorky u kterých byla hodnocená povrchová pórovitost materiálu.



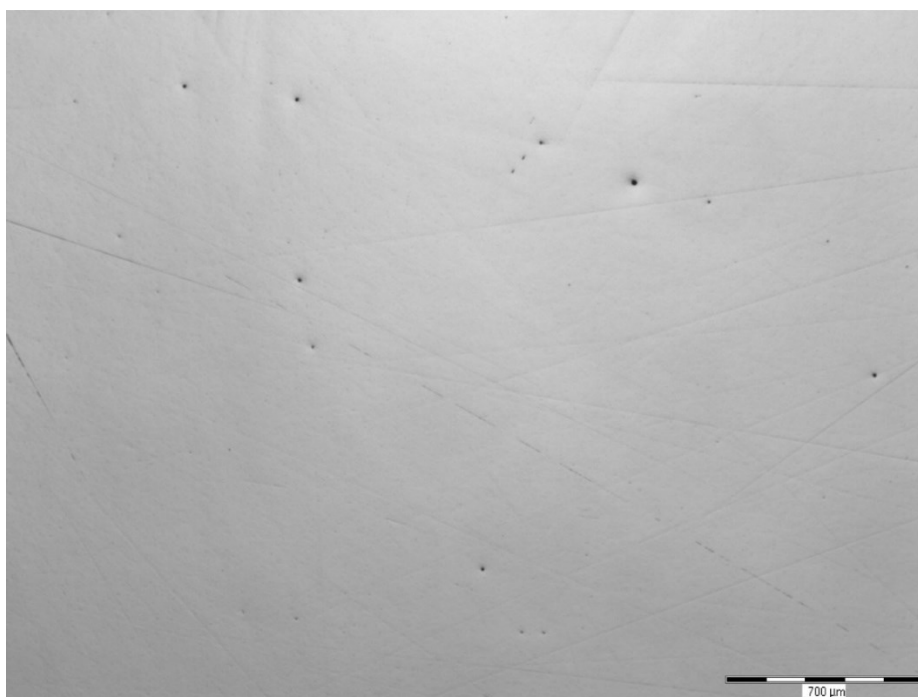
Obrázek 5.1 – Vzorek 200W, na obrázku lze pozorovat dutiny velikosti 60μm a menší póry které mají velikost kolem 8-10μm. Po grafickém vyhodnocení v softwaru bylo zjištěno, že plošná pórovitost je  $1,87 \pm 0,02 \%$ .



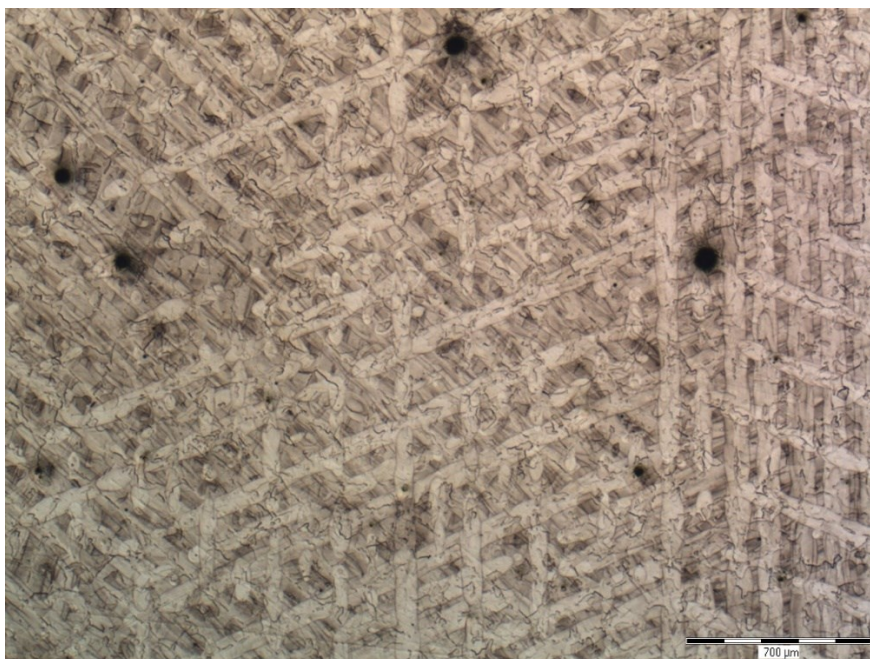
Obrázek 5.2 – Vzorek 200W TZ, na obrázku lze pozorovat dutiny velikosti 8-10μm a menší pórovitost, kde dutiny byly velikosti 0,5-1μm. Pórovitost vztažená na plochu byla  $0,87 \pm 0,01$ . Vzorek prošel tepelným zpracováním a tím se snížila a zjemnila pórovitost materiálu.



Obrázek 5.3 – Vzorek 400W, na obrázku lze vidět shluky velkých dutin v materiálu o velikosti 5-10 $\mu$ m. Dále byly pozorovány menší dutinky o velikosti do 0,5 $\mu$ m. Vyšší výkon laseru z velké části kladně ovlivnil pórovitost materiálu. Vyhodnocená pórovitost byla  $0,311 \pm 0,011$  % povrchu.



Obrázek 5.4 – Vzorek 400W TZ, na obrázku lze vidět vzorek, který byl tepelně zpracovaný a díky tomu se zmenšily dutiny vzniklé při laserovém tavení 3D tisku. Pórovitost materiálu klesla na  $0,110 \pm 0,004$  %.



Obrázek 5.5 – Vzorek 200W. Naleptaná struktura materiálu znázornila plynové dutiny a také postup natavování vrstev materiálu při 3D tisku. Laser taval materiál ve vrstvě lineárně a každá další vrstva byla otočená o  $57,6^\circ$ .

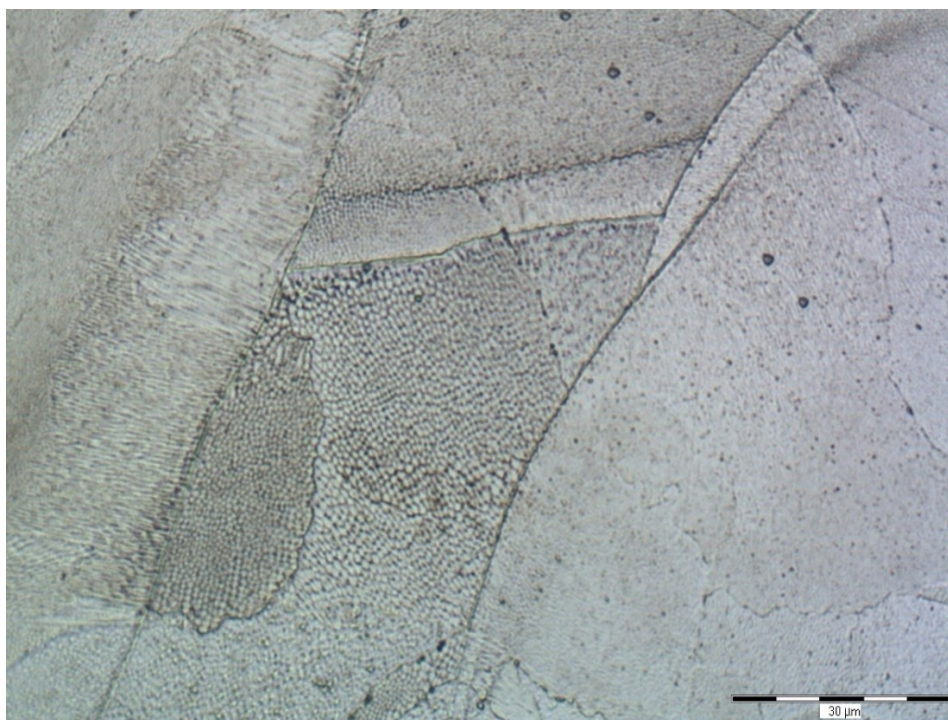


Obrázek 5.6 – Vzorek 200W, detailní záběr morfologie taveného materiálu nám ukazuje, že materiál je austenit. Lze pozorovat mezi jednotlivými řádky, takzvaná austenitická dvojčata. Dále ve struktuře lze vidět hranice zrn, které procházejí z jednoho pásu tavení do druhého.

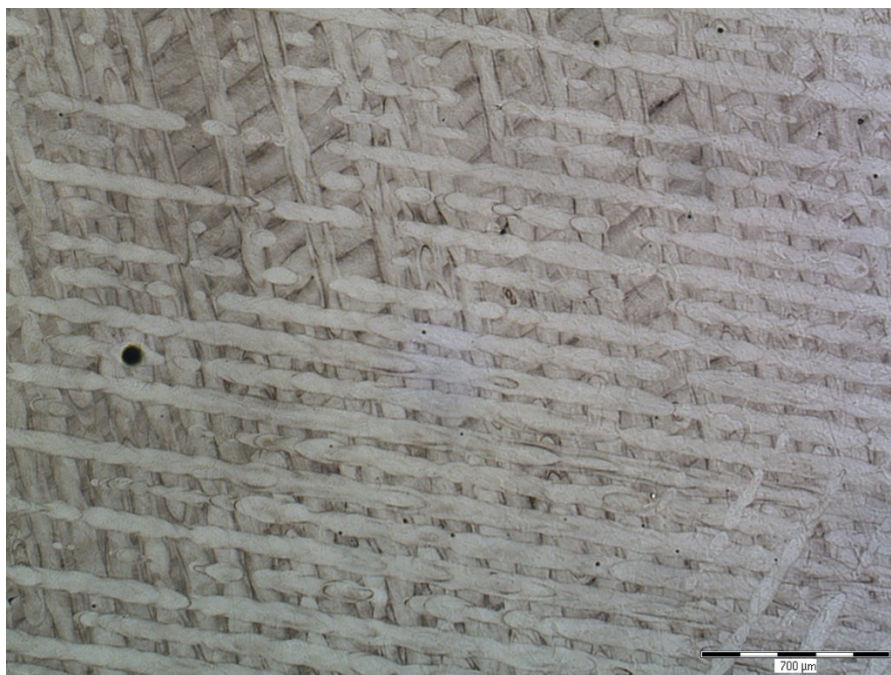




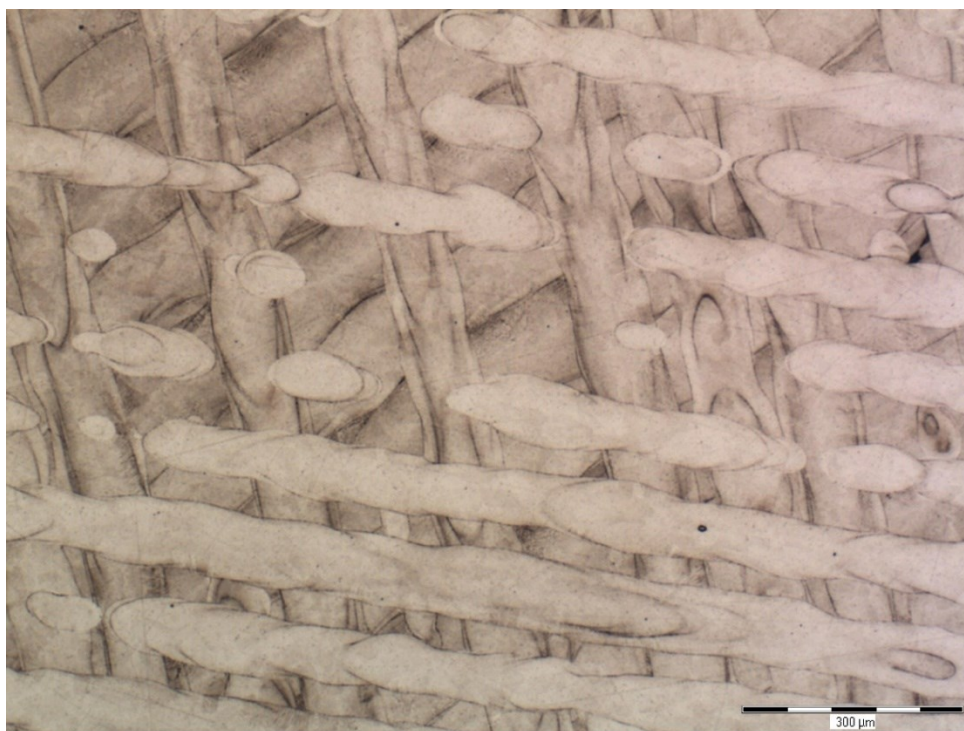
Obrázek 5.7 – Vzorek 200W, na obrázku lze detailněji pozorovat strukturu materiálu a dvojčata ve struktuře.



Obrázek 5.8 – Vzorek 200W, detailní záběr struktury kde lze vidět jak austenitické dvojče, tak i hranice zrn materiálu, dále lze vidět odmíšení v mikroměřítku (dendritická segregace).



Obrázek 5.9– Vzorek 200W TZ, morfologie materiálu je velice podobná jak u vzorku 200W, ale lze zde vidět značný úbytek pórovitosti.



Obrázek 5.10 – Vzorek 200W TZ natavení materiálu lze vidět, že je skoro rovnoměrné, ale nelze pozorovat žádné hranice zrn jako ve vzorku 200W.



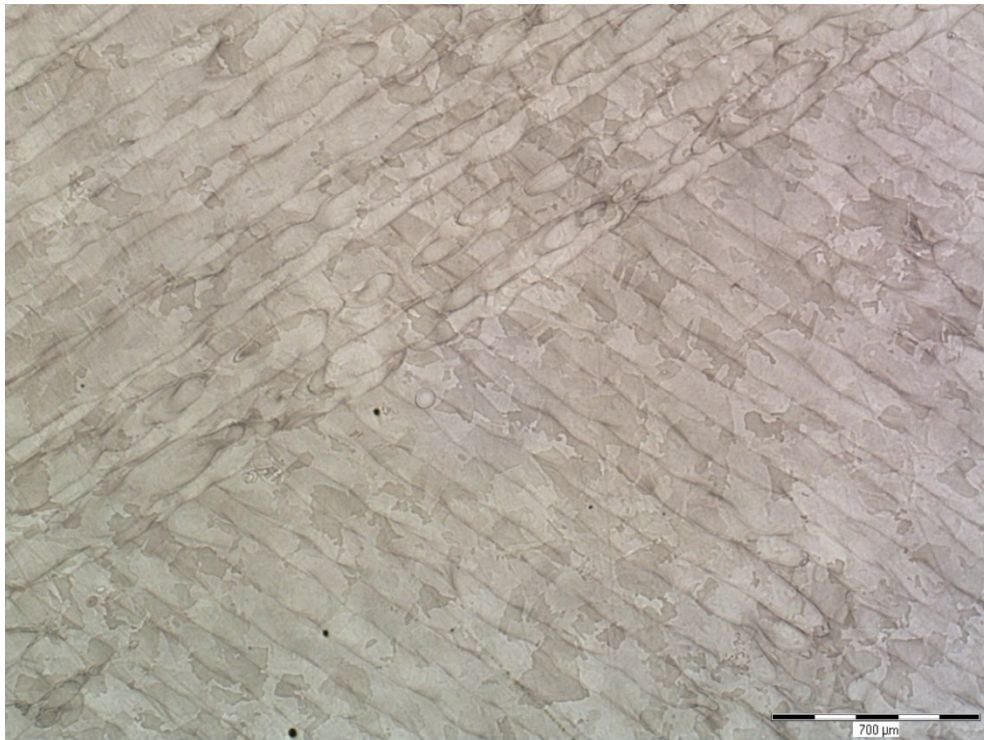


Obrázek 5.11 – Vzorek 200W TZ, na obrázku lze vidět jisté náznaky hranic zrn, které prorůstají jednotlivými natavenými housenkami.

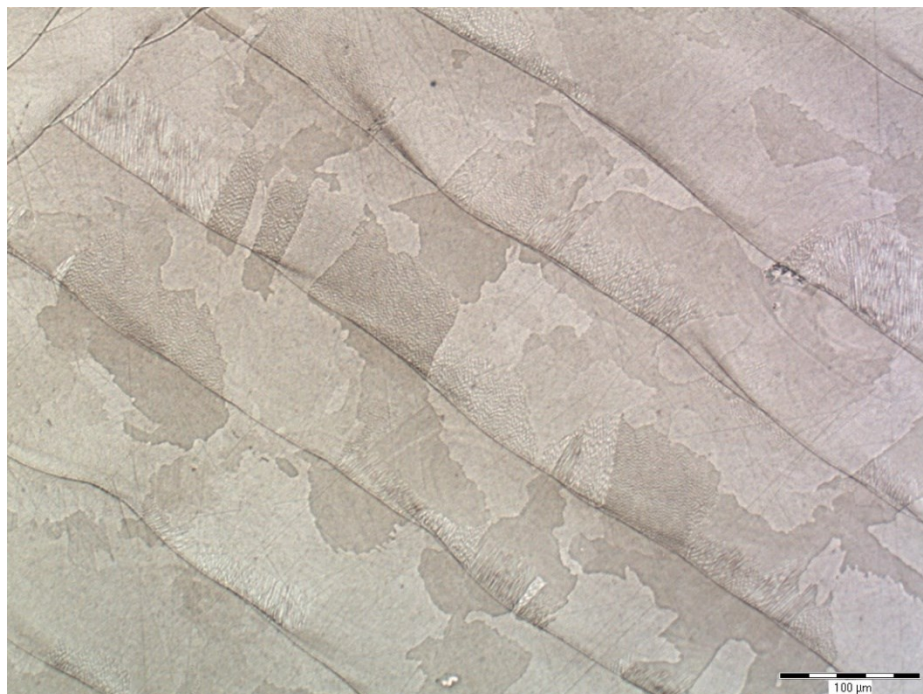


Obrázek 5.12 – Vzorek 200W TZ, na obrázku lze krásně vidět austenitická dvojčata v materiálu, ale hranice zrn jsou skoro nepatrná.

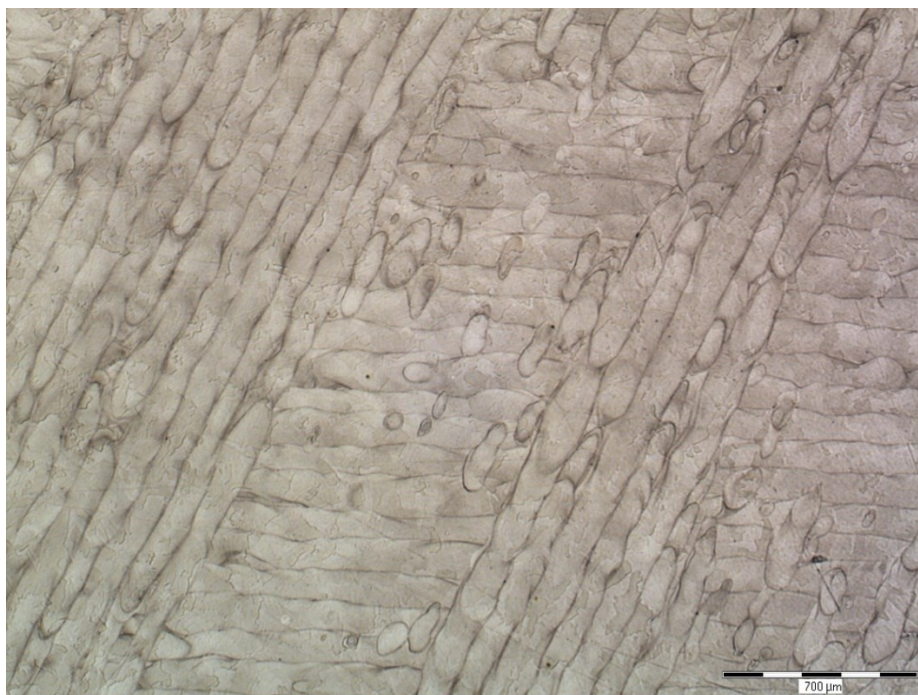




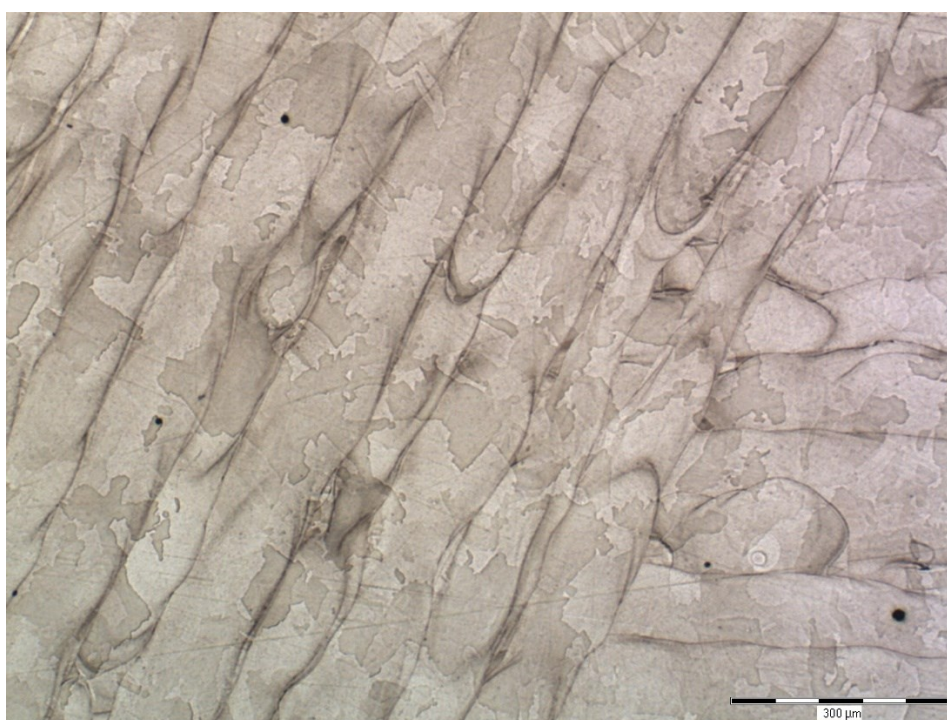
Obrázek 5.13 – Vzorek 400W, lze pozorovat minimální pórovitost materiálu. Dále si lze všimnou, že materiál je rovnoměrně nataven (housenka vedle housenky) a lze zřetelně vidět hranice zrn.



Obrázek 5.14– Vzorek 400W, na obrázku lze vidět jasné hranice zrn, které prorůstají skrz hranice natavených vrstev. Nelze zde však vidět austenitická dvojčata. Housenky se překrývají a nedochází k prosakování spodnějších vrstev materiálu.

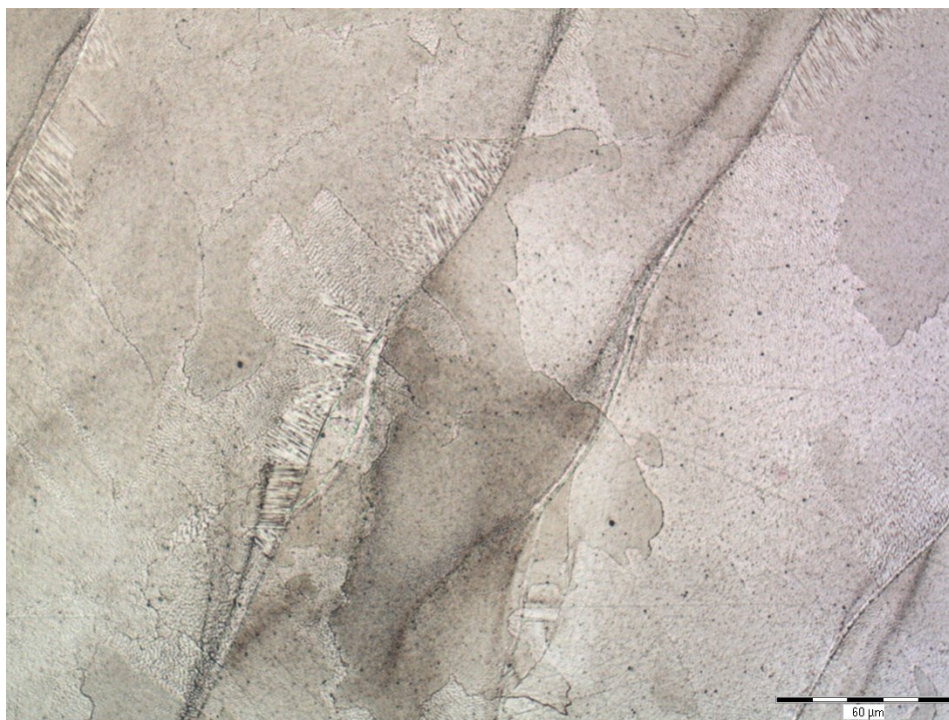


Obrázek 5.15 – Vzorek 400W TZ, struktura po tepelném zpracování nevykazuje skoro žádnou pórovitost. Lze vidět, že mezi jednotlivými natavenými řádky nevznikly mezery, kterými by procházela spodnější vrstva. Lze zde vidět pouze 2 vrstvy.



Obrázek 5.16 – Vzorek 400W TZ, na obrázku lze pozorovat deformaci jednotlivých natavených řádků. Dále lze vidět, že zrna prorůstají jednotlivými řádky a jsou daleko jemnější než u vzorku 400W.





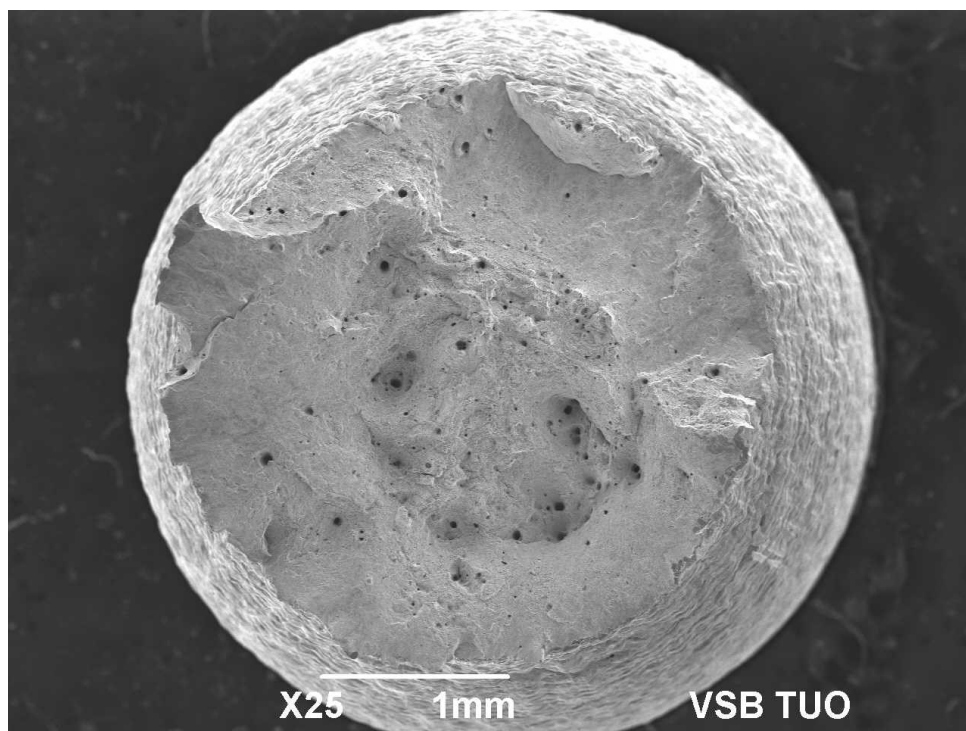
Obrázek 5.17- Vzorek 400W TZ, na obrázku lze pozorovat jasné hranice zrn prorůstající mezi řádky, dále lze vidět jasné deformace housenek mezi sebou a odmíšení v mikroměřítku (dendritická segregace).

Na obrázcích 5.5 až 5.17 lze vidět mikrostrukturu vzorků ý pomocí 3D tisku. Vzorky jsou vytvořené při různé intenzitě laseru a tepelně zpracovány.

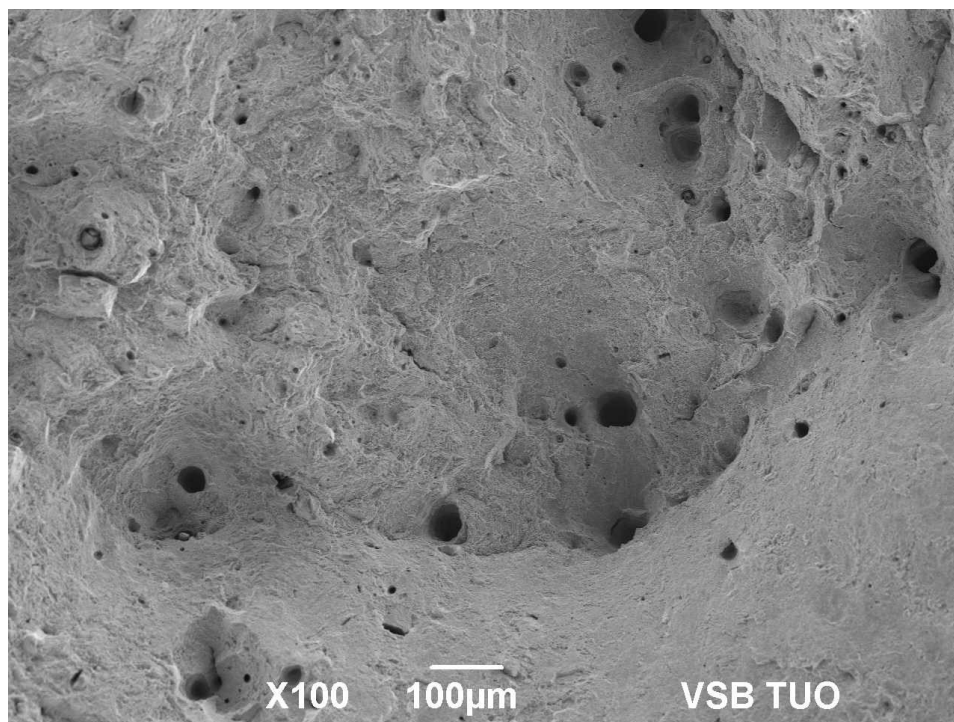
### 5.1. Hodnocení lomových ploch

Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu byly pozorovány lomové plochy zkušebních těles ze zkoušky tahem a rázem v ohybu. Dále bylo ověřeno chemické složení materiálu pomocí energo-disperzní spektrální (EDX) analýzy.

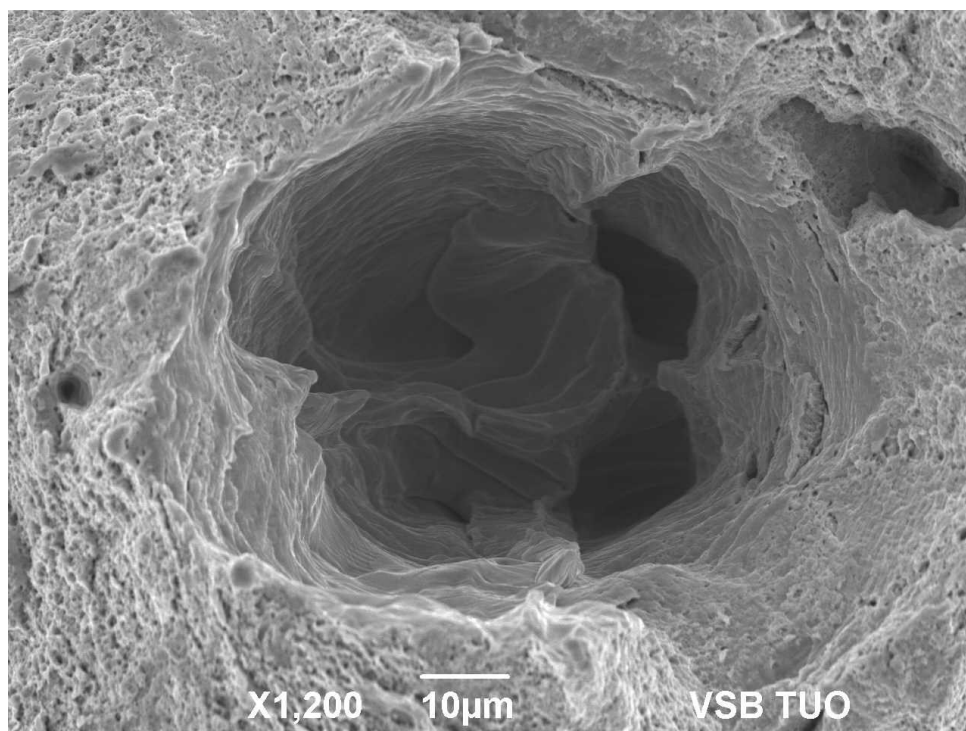
Na obrázcích 5.18 až 5.30 lze pozorovat lomové plochy poručených vzorku ze zkoušky tahem a zkoušky rázem v ohybu. Dále lze vidět na obrázku 5.26 metalografický vybrus vzorku 200W na kterém je dutina, která byla vyplněná inertním plynem.



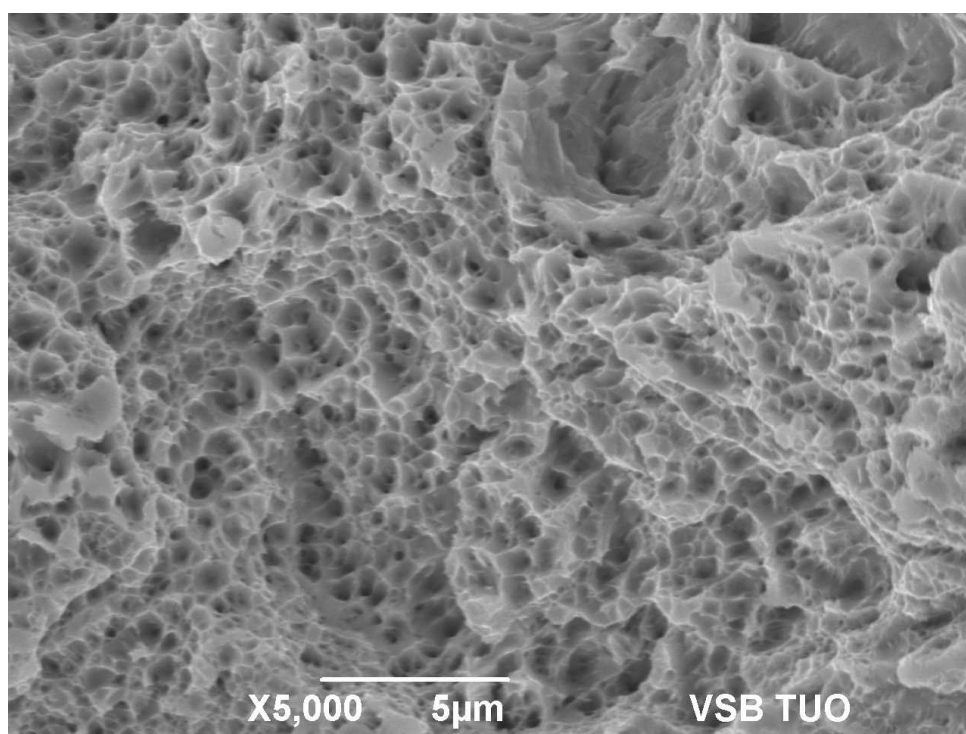
Obrázek 5.18 – Vzorek 200W TZ (tahová tyč), na obrázku lze vidět jasné propojení lomu s dutinami v materiálu, jež fungovaly jako koncentrátoři pro pohyb trhliny.



Obrázek 5.19 – Vzorek 200W TZ (tahová tyč), lze pozorovat vysoký obsah dutin v materiálu velikosti maximálně 50µm.

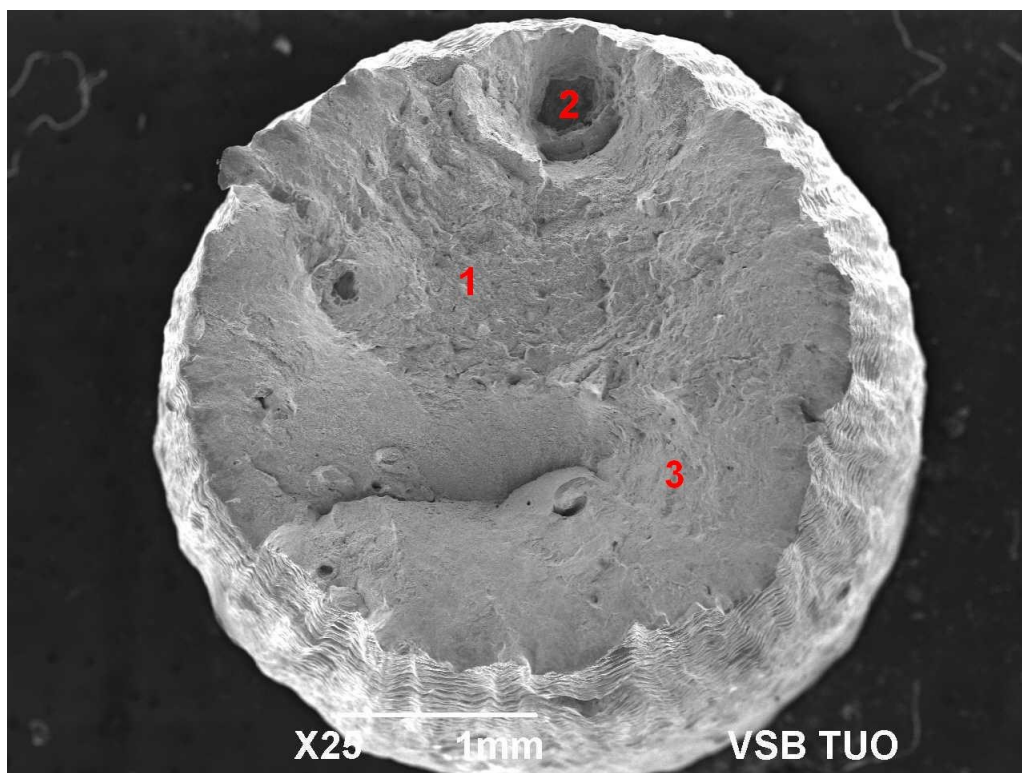


Obrázek 5.20 – Vzorek 200W TZ (tahová tyč), detailní záběr na dutinu v materiálu.

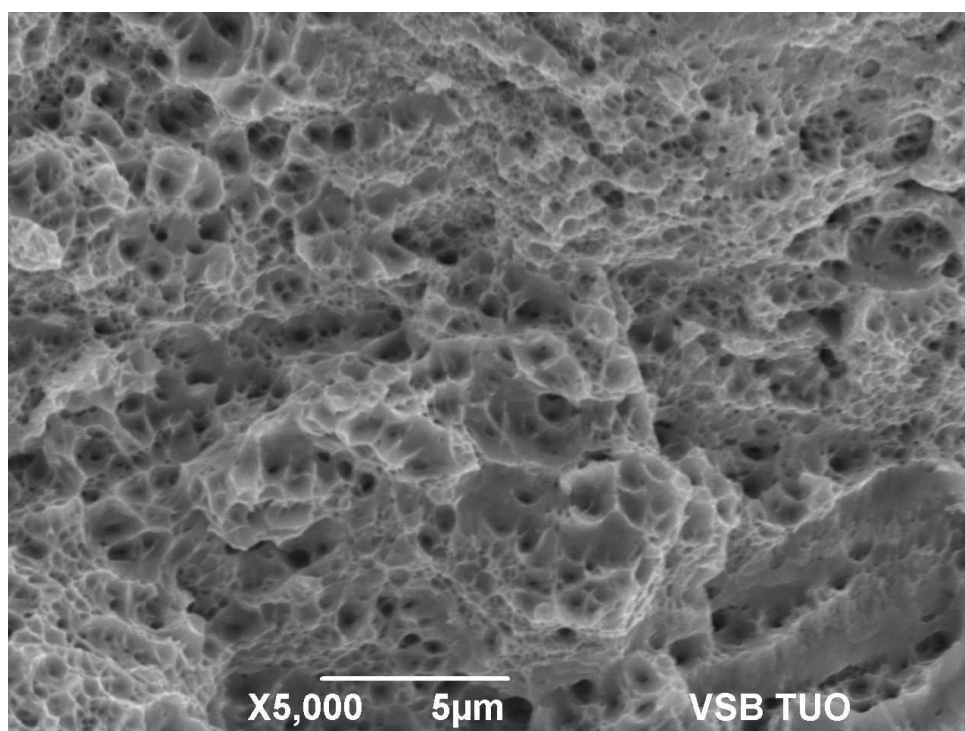


Obrázek 5.21 – Vzorek 200W TZ (tahová tyč), detailní záběr pod mikroskopem nám ukazuje, že se jedná o velice jemný houževnatý lom.

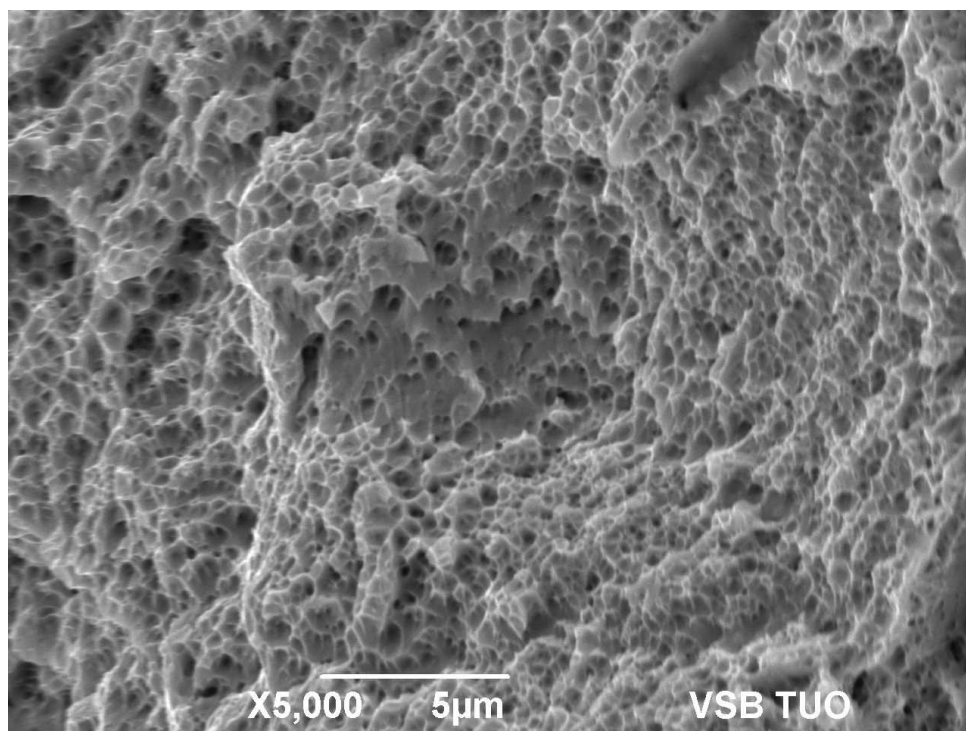




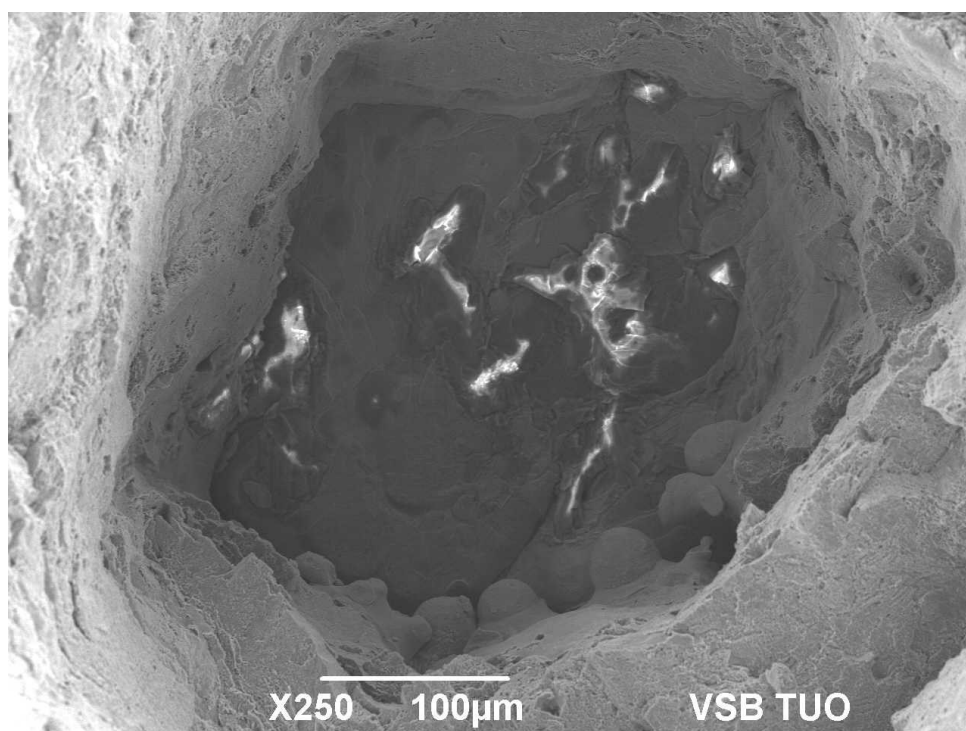
Obrázek 5.22 – Vzorek 400W TZ (tahová tyč), lze pozorovat, že povrch je bez plynových bublin. Detailní záběry z označených míst lze vidět na obrázcích 5.23 až 5.25.



Obrázek 5.23 – Detail 1, lze pozorovat jemný houževnatý lom materiálu.

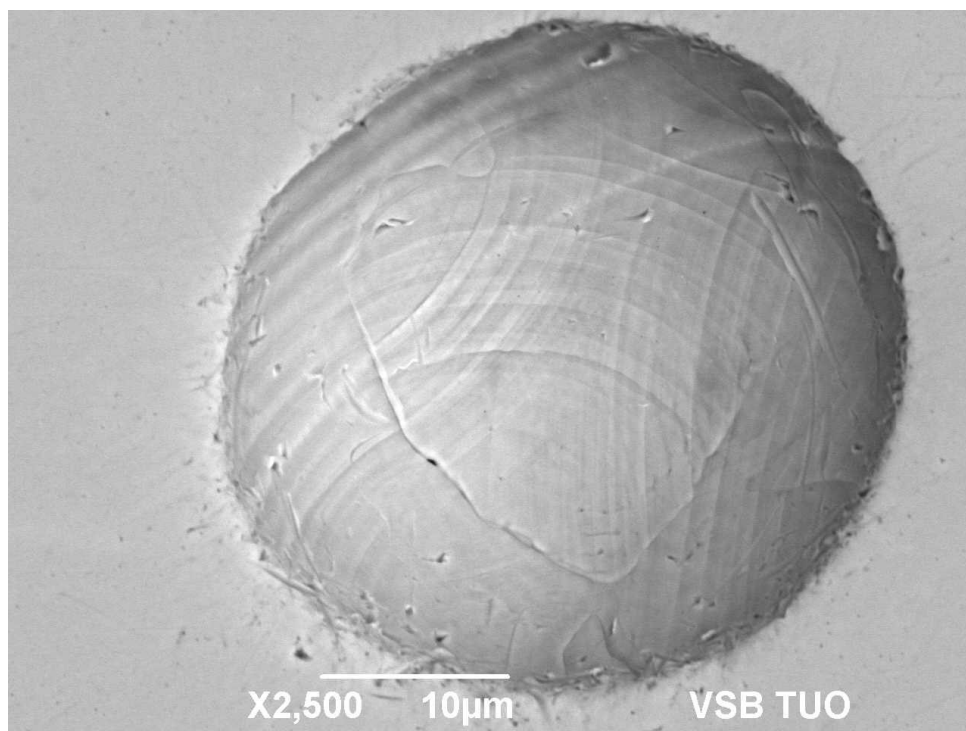


Obrázek 5.24 – Detail 3, na obrázku lze pozorovat jemný houževnatý lom, který je místy jemnější než na detailu 1.

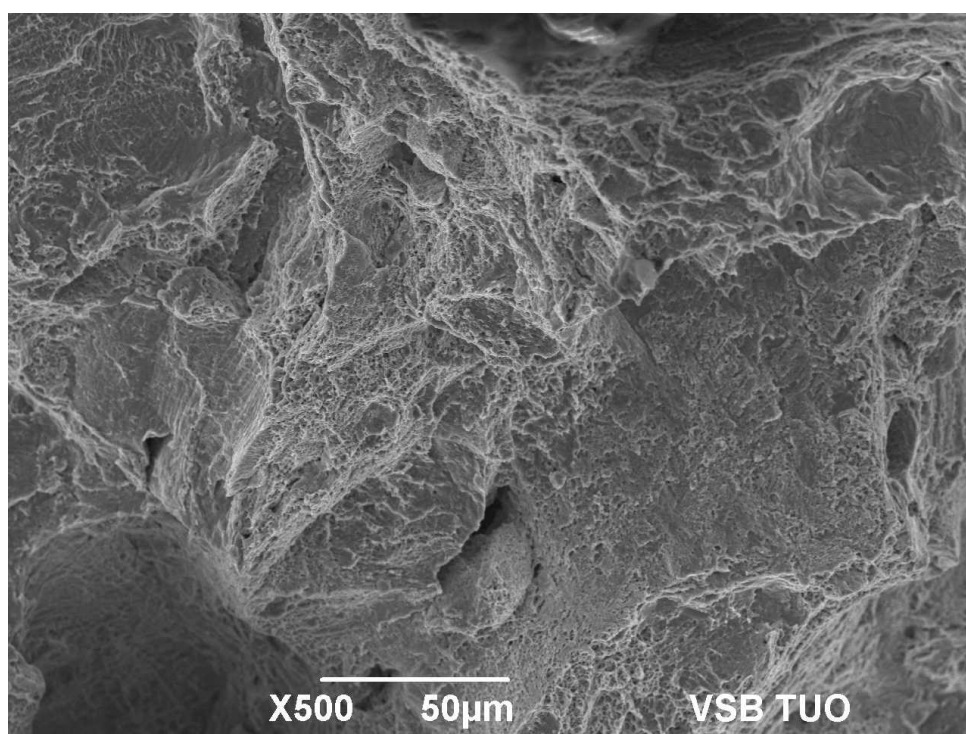


Obrázek 5.25 – Detail 2, na obrázku je plynová bublina. Dole na stěně lze pozorovat kulovité výrůstky. Na sně plynové bubliny lze vidět neodstraněný lak.

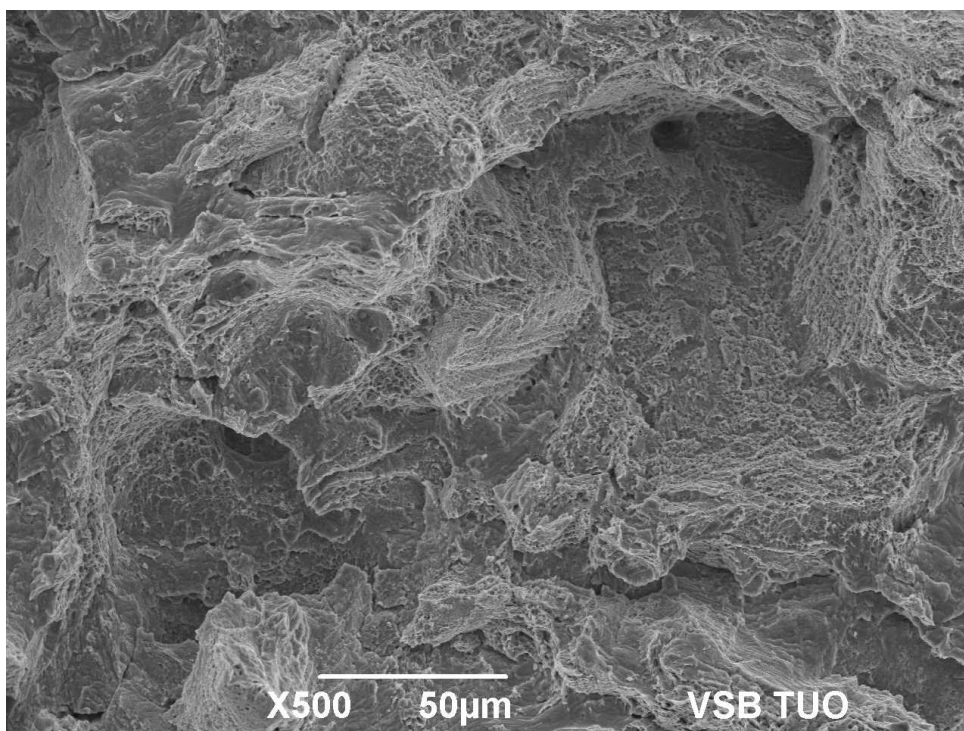




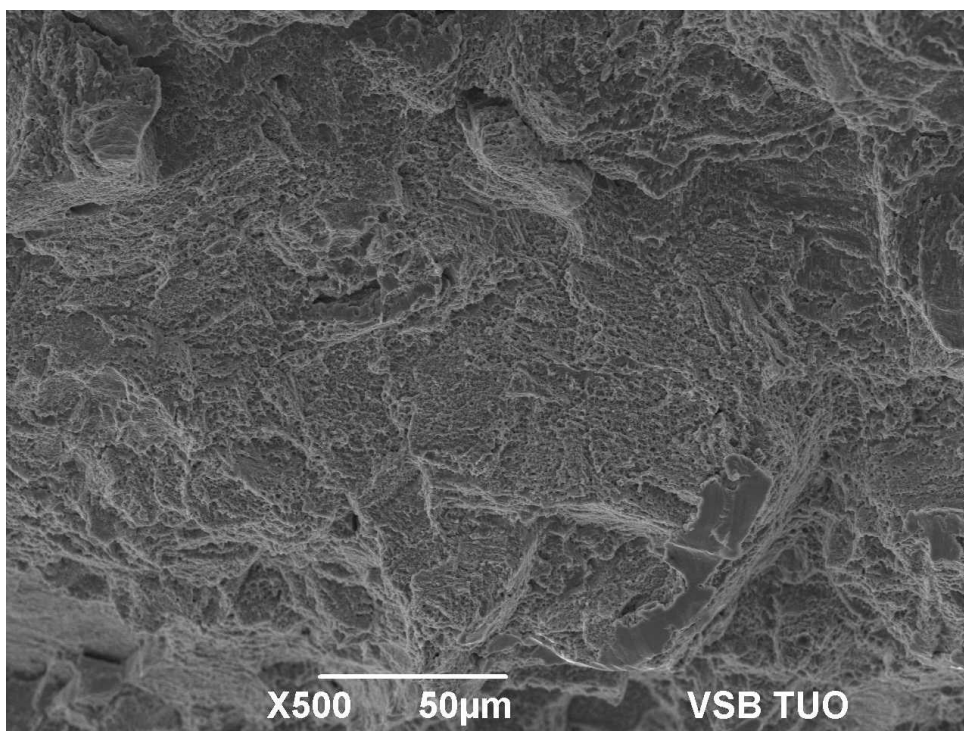
Obrázek 5.26 – Vzorek 200W – dutina vyplněná inertním plynem při tavení.



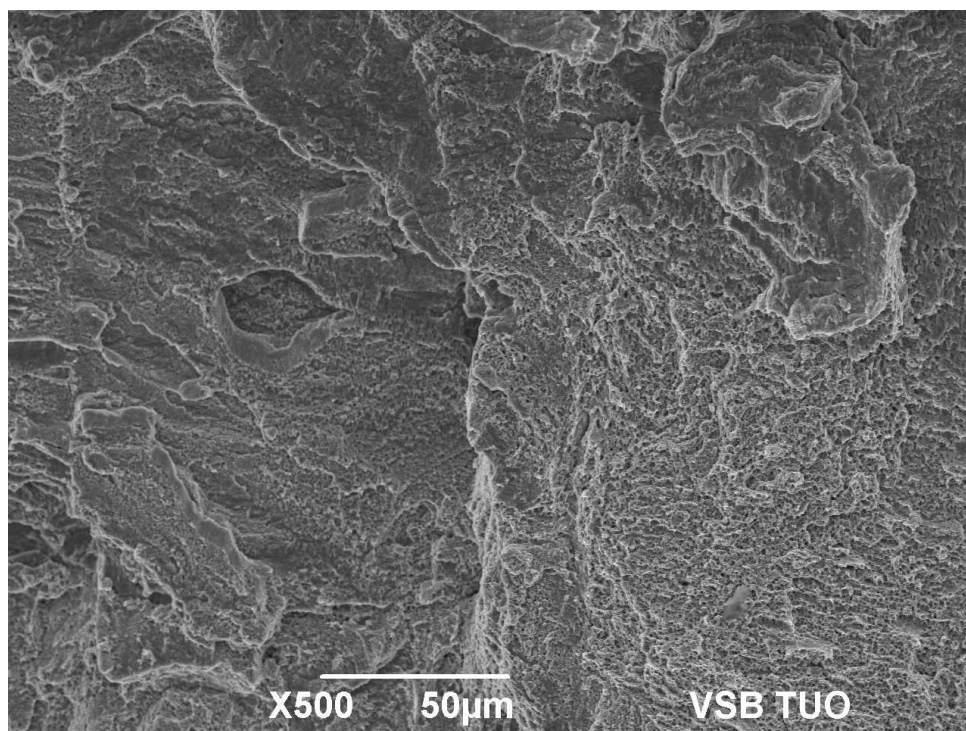
Obrázek 5.27 – Vzorek 200W (vrubová houževnatost) – detail lomu kde lze vidět deformované dutiny v materiálu.



Obrázek 5.28 – Vzorek 200W TZ (vrubová houževnatost) houževnatý lom.

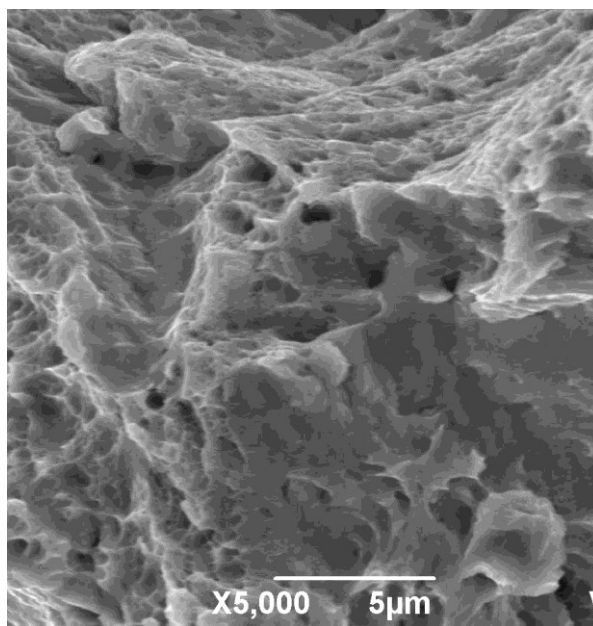


Obrázek 5.29 – Vzorek 400W (vrubová houževnatost) houževnatý lom.

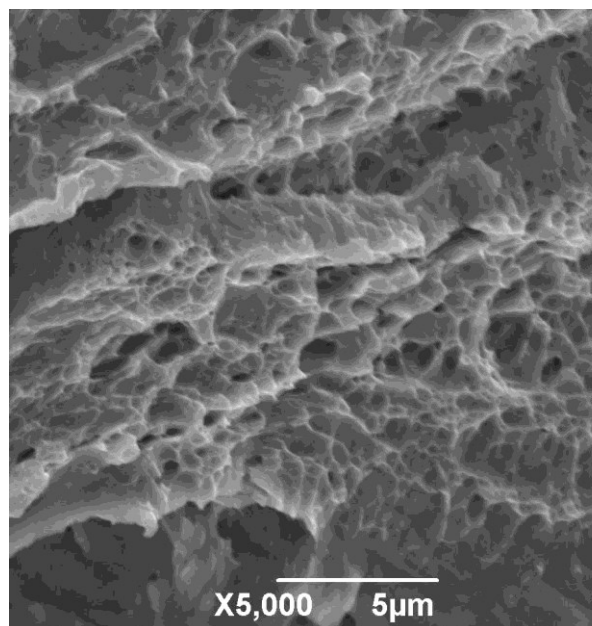


Obrázek 5.30 – Vzorek 400W th (vrubová houževnatost) houževnatý lom.

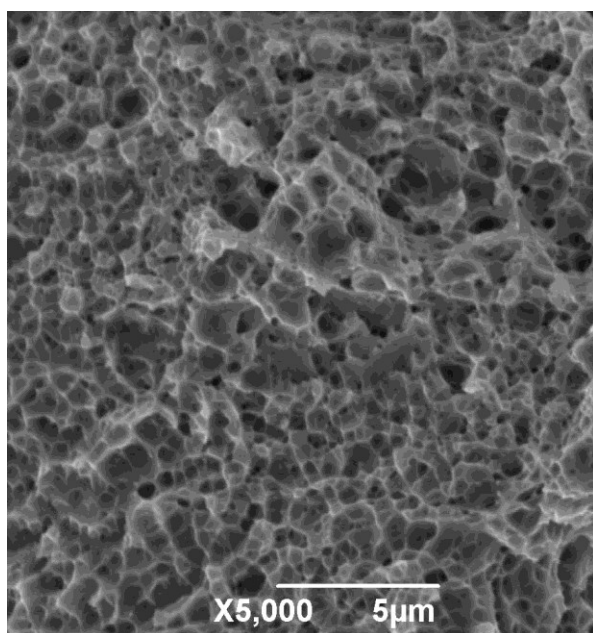
## 5.2. Lomové plochy při maximálním zvětšení



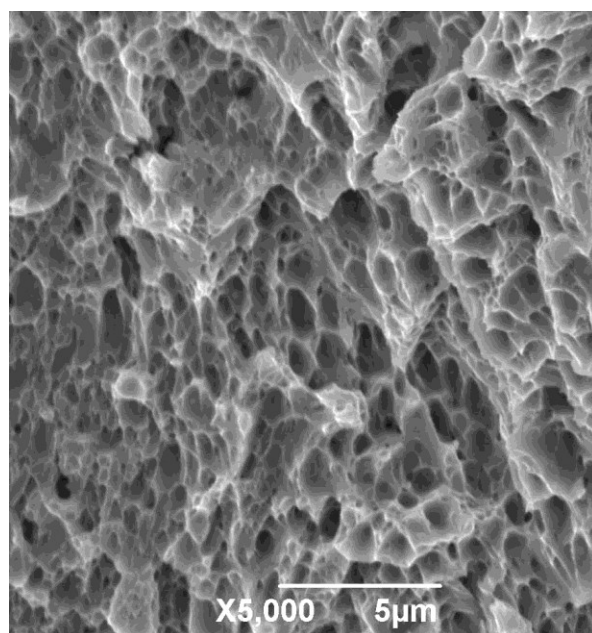
Obrázek 5.31 – Vz 200W



Obrázek 5.32 – Vz 200W tz



Obrázek 5.33 – Vz 400W

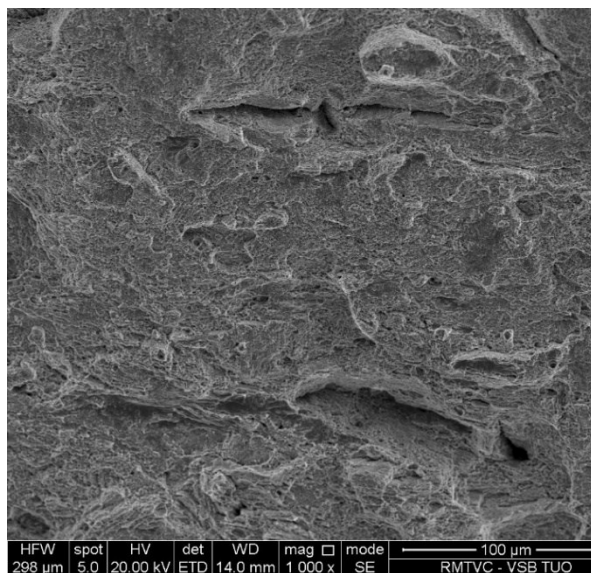


Obrázek 5.34 – Vz 400W rz

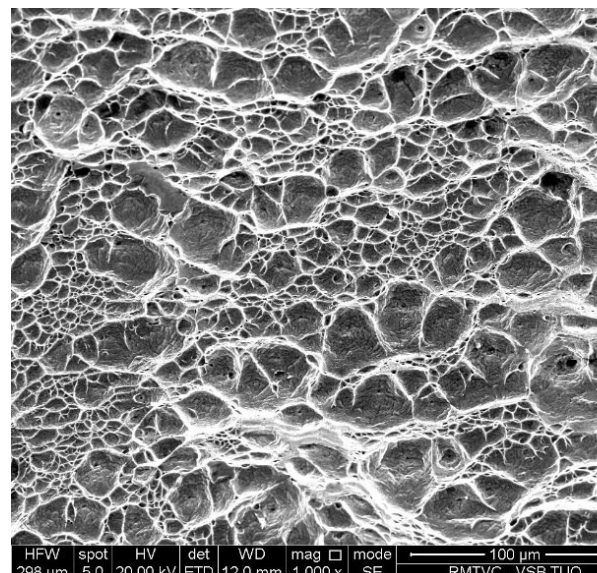
Na obrázcích 5.31 až 5.34 lze pozorovat strukturu lomu při různé výrobě vzorku a tepelném zpracování. Když porovnáme horní obrázky mezi sebou, tak tam není skoro žádný rozdíl, stále se jedná houževnatý lom, který je jemný. Ani tepelné zpracování se neprojeví. Pokud ale porovnáme horní obrázky se spodními, nebo spodní obrázky mezi sebou, můžeme pozorovat,

že lom je dalekou jemnější. Porovnáním vzorku 400W a 400W tz, lze pozorovat, že vzorek před tepelným zpracováním měl daleko jemnější lom než po něm.

Bylo provedeno pozorování lomových ploch z tahových zkušebních těles. Provedlo se tak na tělese vytvořeném pomocí 3D tisu a druhém tělese vytvořeném klasickou metodou (válcování, obrábění).



Obrázek 5.35 Vzorek připravený 3D tiskem

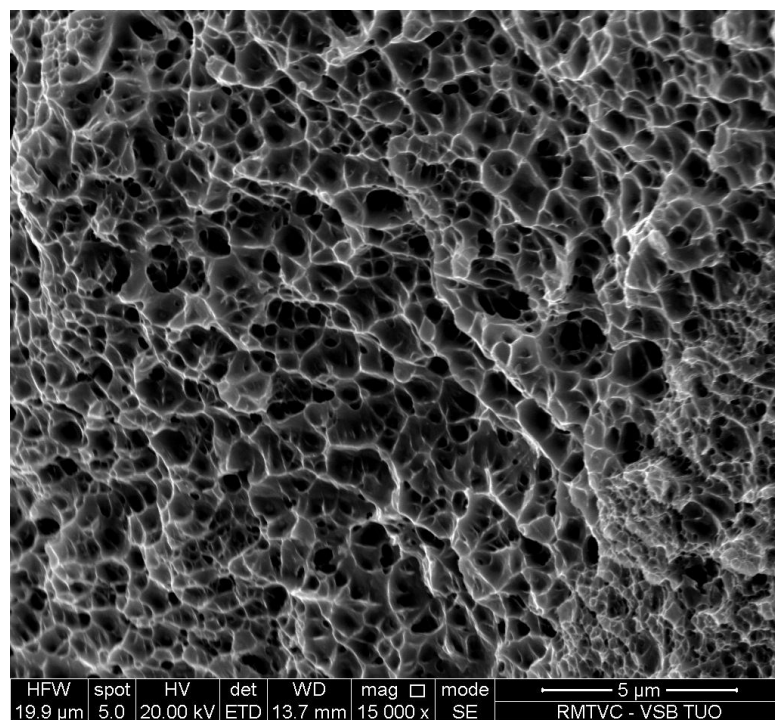


Obrázek 5.36 Vzorek klasicky připravené oceli

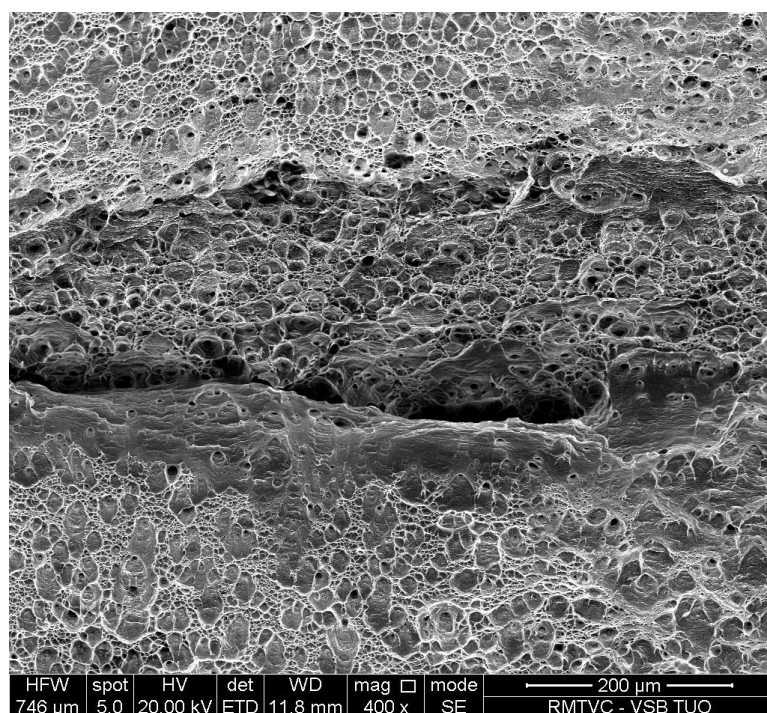
Na obrázcích 5.35 a 5.36 lze sledovat velký rozdíl v lomové charakteristice. Vzorek připraven pomocí 3D tisku je houževnatý, ale vykazuje daleko jemnější houževnatý lom než vzorek připraven klasicky. V porovnání při stejném zvětšení se u 3D vzorku struktura lomu nejeví tak jasně jako u klasické oceli. Při vyšším zvětšení se zobrazí podobná struktura lomu, jak je tomu u vzorku připraveného klasicky.

Pro detailnější záběr struktury vzorku, vyrobeného 3D tiskem, lze vidět na obrázku 5.37. Na obrázku 5.38 lze vidět defekt ve prostřed vzorku, vytvořeného standardní, konzervativní metodou.





Obrázek 5.37 Vzorek připravený 3D tiskem. Na obrázku lze pozorovat velice jemný houževnatý lom.



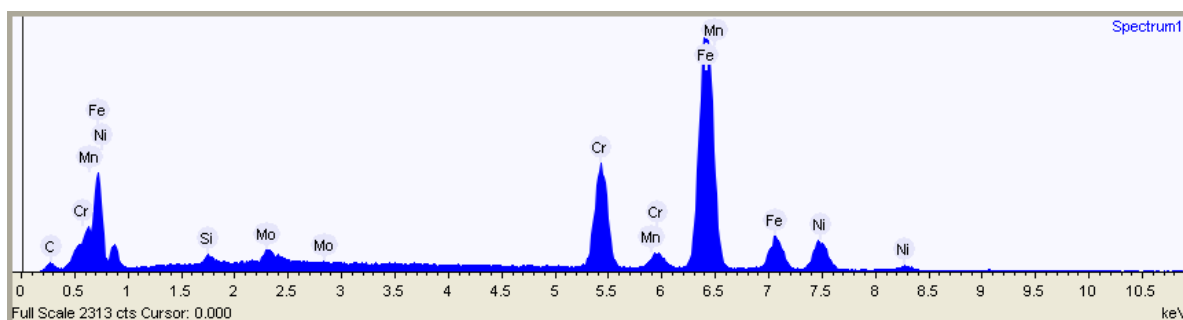
Obrázek 5.38 Vzorek připravený konzervativní metodou. Na obrázku lze sledovat vnitřní vadu materiálu.

## 6. Analýza chemického složení

### 6.1. EDX analýza

Byla provedena na rastrovacím elektronovém mikroskopu (zkratka SEM) JEOL JSM-6490LV vybaveným energiově dispersním analyzátozem (zkratka EDS) INCA x-act.

Obrázek 6.1. EDX analýza.



Tabulka 6.1 Všechny spektra (hm %)

Popis	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Mo
Oblast 1	0,77	17,28	0,56	66,42	12,19	2,78
Oblast 2	0,89	17,59	0,68	65,63	12,44	2,77
Oblast 3	0,90	17,29	0,77	66,36	12,19	2,49
Průměr	0,86	17,39	0,67	66,13	12,27	2,68

V obrázku 6.1 lze pozorovat prvky, byly naměřeny pomocí EDX analýzy. V tabulce 6.1 jsou uvedena data která byla získána pomocí EDX analýzy a byla vyhodnocena. Jedná se o orientační měření.

### 6.2. Porovnání hodnot chemického složení

Tab. 6.2 Chemické složení

Hm%	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
316L klasická	0,03 max	1,00 max	2,00 max	0,025 max	0,010 max	17,0-19,0	2,50-3,20	13,0-15,5	0,10 max
316L 3D EDX	-	0,86	0,67	-	-	17,39	2,68	12,27	-
316L 3D Výrobce	0,03 max	1,00 max	2,00 max	0,045 max	0,03 max	16,0-18,0	2,00-3,00	10,0-14,0	0,10 max

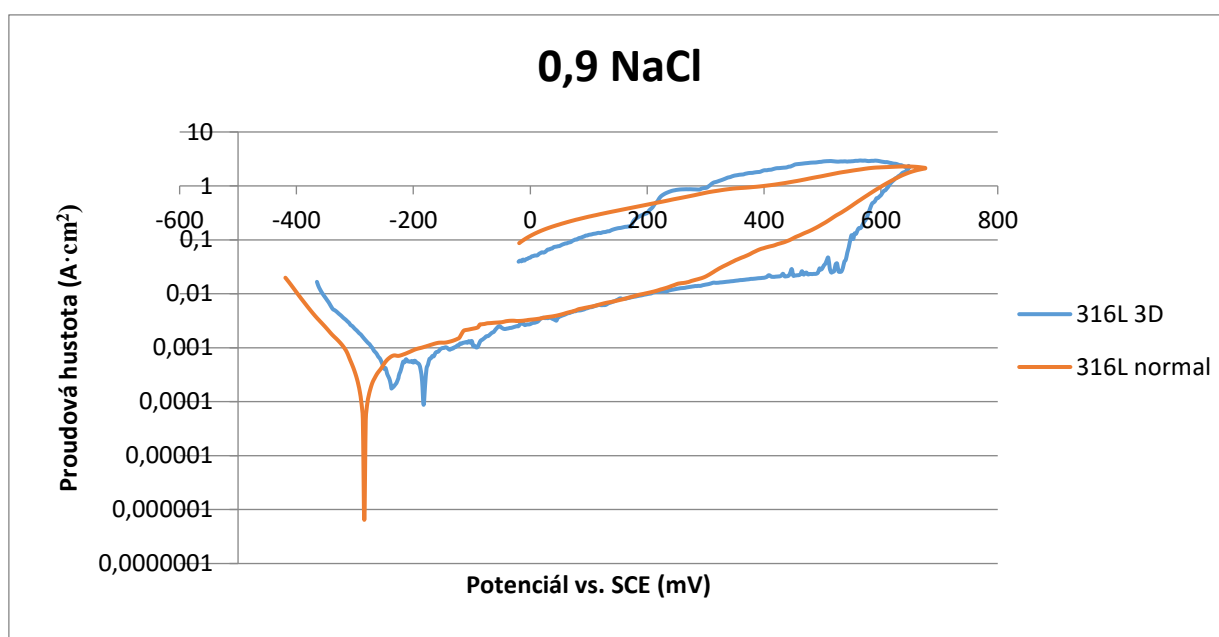
V tabulce 6.2 je uvedené chemické složení oceli podle normy, chemické složení naměřené pomocí EDX analýzy a chemické složení prášku udávané výrobcem.

## 7. Zkouška odolnosti proti koroznímu prostředí

V laboratořích byly provedeny zkoušky na korozní odolnost podle normy ČSN EN ISO 7539. Pro zkoumání korozní odolnosti byly použity dva vzorky, první vzorek byl klasická konvekčně připravená ocel a druhý byl připraven pomocí 3D tisku.

Materiály byly vystaveny koroznímu prostředí kyseliny chlorovodíkové s obsahem 0,9% HCl a 3,5% HCl. Měření bylo prováděno pomocí přístroje VoltaLab PGE100.

Obrázek 6.2. Korozní chování v prostředí 0,9% HCl.



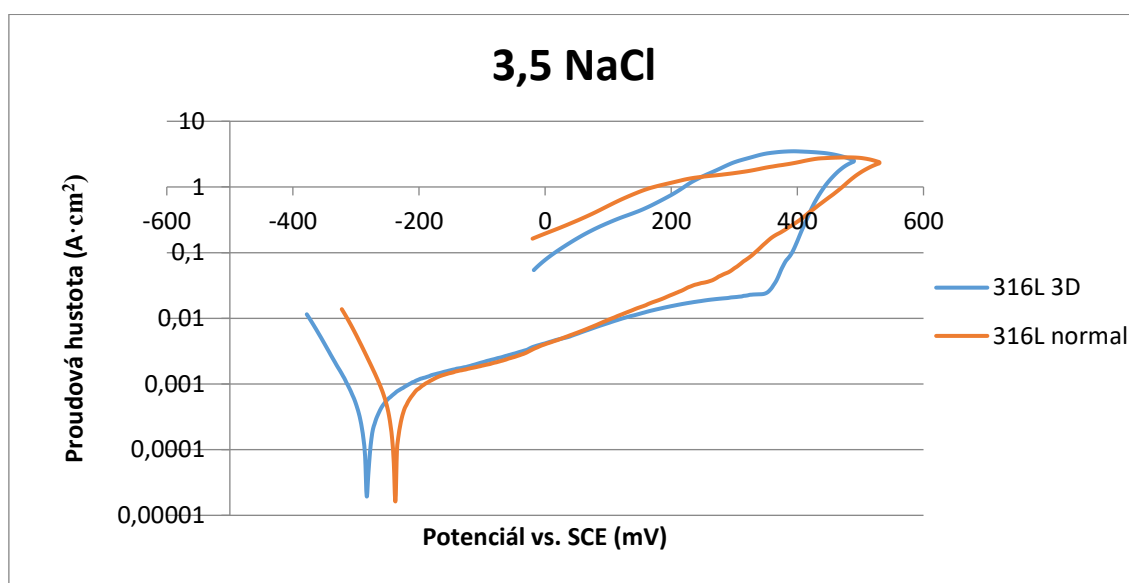
Vypočet byl proveden Tafelovou metodou podle první Sternovy rovnice.

Tabulka 6.2. Korozní vlastnosti v prostředí 0,9% HCl.

	1.Sternova rovnice			2.Sternova rovnice	
	$E(i=0)$ [mV]	$R_p$ [ $A \cdot cm^{-2}$ ]	Corrosion Rate [ $\mu m/Y$ ]	$E(i=0)$ [mV]	$R_p$ [ $A \cdot cm^{-2}$ ]
316L normál	-274.1	55.43	2.427	-269.2	45.17
316L 3D	-242.1	50.25	2.804	-241.7	57.46



Obrázek 6.3. Korozní chování v prostředí 3,5% HCl



Vypočet byl proveden Tafelovou metodou, podle první Sternovy rovnice.

Tabulka 6.3. Korozní vlastnosti v prostředí 3,5% HCl.

	1.Sternova rovnice			2.Sternova rovnice	
	E(i=0) [mV]	Rp [A.cm <sup>2</sup> ]	Corrosion Rate [μm/Y]	E(i=0) [mV]	Rp [A.cm <sup>2</sup> ]
316L normál	-231.3	34.84	3.685	-231.3	37.04
316L 3D	-275.3	48.57	3.556	-275.2	48.55

Výsledky korozních zkoušek odhalily, že vzorek vytvořený pomocí 3D tisku měl nepatrně lepší korozní odolnost v roztoku 0,9% HCl, zatímco v roztoku 3,5% HCl měl trochu horší korozní odolnost oproti klasicky připravenému vzorku. Z tabulek 6.2 a 6.3 lze vidět výsledky korozních zkoušek. Korozní potenciál vzorku vytvořených 3D tiskem vykazoval nepatrně zápornější hodnoty v porovnání se vzorkem klasicky vytvořeným. Rychlost koroze obou vzorů nabývala srovnatelných hodnot, jak lze vidět na obrázcích 6.2 a 6.3.

## Závěr

Diplomová práce je zaměřena na posouzení možností výroby kovových, resp. ocelových produktů metodami tzv. 3D tisku.

V rešeršní části mapuje dosavadní poznatky a zkušenosti týkající se této problematiky, popisuje jednotlivé technologie 3D tisku a typy materiálů vhodných a užívaných k výrobě tímto způsobem s důrazem na oceli řady AISI 316. Tyto materiály jsou často užívány v náročnějších průmyslových, či medicínských aplikacích.

Praktická část práce se soustředí na ocel EN 1.4404, resp. AISI 316L. Porovnává vlastnosti materiálu vyrobeného 3D tiskem a konvenčními technologiemi – tvářením. Byly hodnoceny mechanické a elektrochemické vlastnosti, mikrostrukturní a fraktografické charakteristiky. Také byly srovnány výsledky při rozdílném výkonu tavícího laseru při výrobě.

Vzhledem k náročnosti výroby 3D tiskem se experiment omezil na malé série zkušebních těles, jejichž rozměry byly voleny tak, aby se ve výsledcích projevil případné slabiny použité technologie – obecně tedy zkušební tělesa s minimálním příčným průřezem. Výsledky pak byly srovnávány s obdobným typem zkušebních těles vyrobených konvenčními technologiemi.

Metalografická pozorování prokázala poměrně malou porozitu, kterou lze dále ovlivnit vhodným tepelným zpracováním. Porozita byla závislá na výkonu tavícího laseru a textura, použitá při výrobě vzorku. Byl pozorován rozdíl mezi vzorky, které byly vystaveny nižší intenzitě tavení než vzorky, které byly vystaveny vyšší intenzitě. Při velkém zvětšení, ve struktuře bylo pozorované jemné odmišení (dendritická segregace).

Orientačně byla provedena také EDX analýza chemického složení, která potvrdila jakost materiálu.

Výsledky mechanických zkoušek přinesly tyto poznatky:

Zkouška tahem ukázala, že materiál má výbornou plasticitu. Vzorky vykazovaly plasticitu kolem 25%. Ve srovnání s klasicky připravenými vzorky, byla hodnota plasticity dvojnásobná. Vzorky 3D tisku vykazovali velice shodné mechanické vlastnosti při zkouškách. U obou vzorků byly hodnoty kontrakce a modulu pružnosti velice shodné.

Zkouška rázem v ohybu ukázala chování materiálu při různém zpracování výroby a tepelném zpracování. Vzorky, vytvořené s nižší intenzitou tavení, vykazovaly díky své pórovitosti velký pokles absorbované energie. Bylo to zapříčiněno vysokou pórovitostí

materiálu. Po tepelném zpracování byla naměřené vyšší hodnota absorbované energie. Toto tvrzené se však nepotvrdilo u vzorů s vyšší intenzitou tavení.

Zkouška tvrdosti podle Vickerse prokázala, že vzorky vytvořené pomocí 3D tisku mají menší tvrdost, než vzorky vytvořené konzervativním způsobem. Lze však polemizovat s tímto tvrzením, protože vzorky vytvořené 3D tiskem nebyly nijak mechanicky zpevňovány.

Na lomových plochách zkušebních těles bylo provedeno základní fraktografické šetření, které ukázalo jemný houževnatý lom po celé ploše porušení. Velký vliv na mechaniku porušení měli póry v materiálu, které fungovaly jako koncentrátoři, kudy se šířili trhliny.

Korozní testy odhalily, že vzorek vytvořený pomocí 3D tisku měl nepatrně lepší korozní odolnost v roztoku 0,9% HCl, zatímco v roztoku 3,5% HCl měl trošku horší korozní odolnost oproti klasicky připravenému vzorku. Korozní potenciál, vzorku vytvořených 3D tiskem, vykazoval nepatrně zápornější hodnoty, v porovnání se vzorkem klasicky vytvořeným. Rychlost koroze obou vzorů nabývala srovnatelných hodnot.

## Použitá literatura

- [1] The History of 3D Printing. AllThat3D | 3D Printing News, Magazine, and Blog [online]. AllThat3D.com [cit. 07.05.2018]. Dostupné z: <https://www.allthat3d.com/3d-printing-history/>
- [2] MARUO, S. a K. IKUTA. *Submicron stereolithography for the production of freely movable mechanisms by using single-photon polymerization*. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2002, 70-76. ISSN 0924-4247.
- [3] BARNATT, Ch. *3D printing: the next industrial revolution*. S.l.: ExplainingTheFuture.com, 2013. ISBN 9781484181768.
- [4] Digital Light Processing in: think3d [online] [Cit. 7.5.2018]. Dostupné z <https://www.think3d.in/wp-content/uploads/2016/01/Digital-Light-Processing-DLP.png>
- [5] Laminated Object Manufacturing in: Overviews [online] [Cit. 7.5.2018]. Dostupné z <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>
- [6] Materialgeeza SLS system schematic in: Wikimedia [online] [Cit. 7.5.2018] Dostupné [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective\\_laser\\_melting\\_system\\_schematic.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective_laser_melting_system_schematic.jpg)
- [7] SEAGLE, S. R., R. L. MARTIN a O. BERTEA. *Electron-Beam Melting*. JOM. 1962, 812–820. ISSN 1543-1851.
- [8] Electron Beam Melting (EBM) in: additively [online] [Cit. 7.5.2018] Dostupné z <https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting>
- [9] DAS, S., D.L. BOURELL a S.S. BABU. *Metallic materials for 3D printing*. MRS Bulletin. 2016, 729-741. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2016.217>.
- [10] KRUTH, J.P., L. FROYEN, J. VAN VAERENBERGH, P. MERCELIS a M. ROMBOUTS. *Selective laser melting of iron-based powder*. Journal of Materials Processing Technology. 2004, 616-622. ISSN 0924-0136.
- [11] MCEVILY, A. J. *Metal failures: mechanisms, analysis, prevention*. Second edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013. ISBN 978-1118163962.
- [12] MÄKINEN, M., E. JAUHIAINEN, V.P. MATILAINEN a J. RIIHIMÄKI. *Preliminary Comparison of Properties between Ni-electroplated Stainless Steel Parts Fabricated with Laser Additive Manufacturing and Conventional Machining*. Physics Procedia. 2015, 337-346. ISSN 1875-3892.
- [13] ABOULKHAIR, N.T., N.M. EVERITT, I. ASHCROFT a Ch. TUCK. *Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting*. Additive Manufacturing. 2014, 77-86. ISSN 2214-8604.

- [14] FRANÇOIS, D., A. PINEAU a A. ZAOUI. *Mechanical behaviour of materials. 2nd, updated ed.* Dordrecht: Springer, 2012. ISBN 9789400725461.
- [15] HEINL, P., L. MÜLLER, C. KÖRNER, R.F. SINGER a F.A. MÜLLER. *Cellular Ti–6Al–4V structures with interconnected macro porosity for bone implants fabricated by selective electron beam melting.* Acta Biomaterialia. 2008, 1536-1544. ISSN 1742-7061.
- [16] PORTER, D. A., K. E. EASTERLING a Mohamed Y. SHERIF. *Phase transformations in metals and alloys. 3rd ed.* Boca Raton, FL: CRC Press, c2009. ISBN 9781420062106.
- [17] MUELLERA, B. a D. KOCHANB. *Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry.* Computers in Industry. 1999, 47-53. ISSN 0166-3615.
- [18] DEEV, A.A., P.A. KUZNETCOV a S.N. PETROV. *Anisotropy of Mechanical Properties and its Correlation with the Structure of the Stainless Steel 316L Produced by the SLM Method.* Physics Procedia. 2016, 789-796. ISSN 1875-3892.
- [19] CHU, W.S., Ch.S. KIM, H.T. LEE a J.O. CHOI. *Hybrid manufacturing in micro/nano scale: A Review.* International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. 2014, 75–92. ISSN 2198-0810.
- [20] MA, Ch., Y. DONG a Ch. YE. *Improving Surface Finish of 3D-printed Metals by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification.* Procedia CIRP. 2016, 319-322. ISSN 2212-8271.
- [21] KIM, G.H., J.G. SON, S. PARK a W.D. KIM. *Hybrid Process for Fabricating 3D Hierarchical Scaffolds Combining Rapid Prototyping and Electrospinning.* Macromolecular Rapid Communications. 2008, 319-322. ISSN 1577-1581.
- [22] Italinox. Italinox [online]. [cit. 07.05.2018]. Dostupné z: <http://www.italinox.cz/>
- [23] Ocelex. OCELEX spol. s.r.o. [online] [Cit. 7.5.2018]. Dostupné z: <http://ocelex.sk/>  
*Materiálové listy*
- [24] Armat spol. s.r.o. [online]. Dostupné z: <http://www.armat.cz> *Materiálové listy*
- [25] Materiálove listy. Heyman [online] [Cit. 7.5.2018] Dostupné z: <https://www.heyman.cz/> *Materiálove listy*
- [26] HANSEN, Ch., J. WIEFERICH, F. RITTER, Ch. RIEDER a H.O. PEITGEN. *Illustrative visualization of 3D planning models for augmented reality in liver surgery.* International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. 2010, 133–141. ISSN 1861-6410.

- [27] BBC SCRENGRAB model of heart in Tribune [online] [Cit. 7.5.2018] Dostupné z <https://tribune.com.pk/story/828760/3d-printed-model-of-heart-helps-doctors-in-britain-save-two-year-olds-life/>
- [28] BOSE, S., S. VAHABZADEH a A. BANDYOPADHYAY. *Bone tissue engineering using 3D printing*. Materials Today. 2013, 496-504. ISSN 1369-7021.
- [29] WILLIAMS, J.M., A. ADEWUNMI, R.M. SCHEK a C.L. FLANAGAN. *Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering*. Biomaterials. 2005, 4817-4827. ISSN 0142-9612.
- [30] MURR, L.E. a W.L. JOHNSON. *3D metal droplet printing development and advanced materials additive manufacturing*. Journal of Materials Research and Technology. 2017, 77-89. ISSN 2238-7854.